

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Keemia instituut

Grete Kaljulaid

Kasvuhoonegaaside emissioonid
kompostimisel bokashi meetodiga

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

Juhendaja MSc Karin Hellat

Kaasjuhendaja MSc Teele Sikka

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:



31.05.2020

TARTU 2020

Kasvuhoonegaaside emissioonid kompostimisel bokashi meetodiga

Märksõnad: kasvuhoonegaasid, süsinikdioksiid, diämmastikoksiid, metaan, kompostimine, bokashi.

CERCS: T270 Tehnikateadused, Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll.

Töö eesmärgiks oli uurida toidujäätmete anaeroobsel fermenteerimisel põhinevat kompostimist (bokashi meetodit) ja analüüsida kasvuhoonegaaside (CO_2 , N_2O ja CH_4) tekke koguseid ja kontsentratsioone selles protsessis. Bokashiks nimetatakse lagunenu orgaanilist materjali, mille valmimisele on kaasa aidanud spetsiifilised mikroorganismide. Kirjanduse andmetel on biolagunevate jäätmete kompostimisel bokashi meetodiga kasvuhoonegaaside emissioon väiksem kui tavakompostimisel. Eksperimendis kasutati fermenteerimiseks toidujäätmeid, millele lisati bokashi kliisid. Bokashi komposti valmimise protsess kestis kaks nädalat. Saadud kasvuhoonegaaside emissioonide mõõtmistulemusi saab võrrelda kirjanduses olevate andmetega.

Emissions of greenhouse gases from composting with bokashi method

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, nitrous oxide, methane, composting, bokashi.

CERCS: T270 Technological sciences, Environmental technology, pollution control.

The aim of this work was to examine composting of food waste based on anaerobic fermentation, called bokashi method. Emissions of greenhouse gases (CO_2 , N_2O and CH_4) produced in this process were analyzed. Bokashi compost is an organic material, which is produced from biodegradable waste by specific microorganisms. Based on literature data, emissions of greenhouse gases from composting process of biodegradable waste with bokashi method are smaller than those from usual composting. Bokashi bran containing suitable microorganisms was added to the food waste in the experimental work for two weeks. Measured results of GHG emissions can be compared to literature data.

Sisukord

SISSEJUHATUS	4
1 BIOJÄÄTMED	5
1.1 Toidujäätmed	6
2 BIOKÄITLUSVIISID	8
2.1 Kompostimine	8
2.1.1 Kompostimisel eralduvad kasvuhoonegaasid	11
2.2 Kompostimine bokashi meetodil	12
3 KASVUHOONEGAASIDE KOGUSED EESTIS	14
4. EKSPERIMENTAALNE OSA	18
4.1 Eelkatse	20
4.1.1 Eelkatse tulemused	21
4.2 Teine katseperiood	23
4.2.1 Teise katseperioodi tulemused	24
4.3 Tulemused ja arutelu	28
KOKKUVÕTE	32
SUMMARY	33
Tänuavaldused	34
KASUTATUD KIRJANDUS	35
LISAD	38
Lisa 1. Bokashi komposter ja fotod kasutatud katseseadmest.	38
Lisa 2. Toortoidu jääkide kompostimine.	38
Lisa 3. Teise katseperioodi kompostitav materjal.	39
Lisa 4. Bokashi kompostimise eksperimentaalse osa mõõtmistulemused	40
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	43

SISSEJUHATUS

Kasvuhoonegaase paisatakse atmosfääri kõige enam inimtegevuse tagajärjel – esikohal on emissioonid fossiilsete kütuste põletamisest nii transpordisektorist kui ka energeetilistel eesmärkidel (elektri- ja soojusenergia tootmine, tööstused).

Kasvuhoonegaase lisandub atmosfääri ka jäätmekäitlusest – jäätmete põletamisel ja biolagunevatest jäätmetest anaeroobsel käitlusel toodetud biogaasi energeetilisel kasutamisel, prügilatest prügilagaasina ja biolagunevate jäätmete kompostimisel. Inimkonna jõukuse suurenemine on kaasa toonud ka jäätmetekke, sealhulgas ka biolagunevate jäätmete tekke kiire kasvu.

Jäätmete liigiti kogumine, taaskasutus ja jäätmekäitlusviisid puudutavad kõiki inimesi, sest sellest sõltub jätkusuutliku ühiskonna rajamine, sealhulgas ka kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamine, mis on üks inimkonna ees seisvatest ja lahendamist vajavatest globaalsetest ülesannetest. Biolagunevate jäätmete käitlusega seonduv on samuti üks võimalus kontrollida kasvuhoonegaaside teket, seetõttu tekkis huvi käesoleva bakalaureusetöö raames uurida bokashi meetodil kompostimist kasvuhoonegaaside tekke aspektist ning võrrelda seda tavakompostimisel atmosfääri eralduvate emissioonidega.

Töö eesmärk on uurida olmes tekkivate toidujäätmete fermenteerimisel põhinevat kompostimist (bokashi meetodit) ja analüüsida kasvuhoonegaaside teket selles protsessis. Bokashi kompostimine toodab kirjanduse andmetel vähem kasvuhoonegaase kui tavakompostimine. Lisaks on protsess lõhnatu, kiire ja sobib ka väiksesse majapidamisse. Pärast kahenädalast fermenteerimist viiakse kompost mulda, mis teeb bokashist taimedele väärtusliku toitaineallika.

Eksperimentaalses töös uuritakse süsihappegaasi, metaani ja diämmastikoksiidi emissioone bokashi meetodil läbiviidavas kompostimisprotsessis.

1 BIOJÄÄTMED

Eesti Vabariigi Jäätmeseaduses §5 on biolagunevate jäätmete mõiste defineeritud järgnevalt: “Biolagunevad jäätmed on anaeroobselt või aeroobselt lagunevad jäätmed, nagu toidujäätmed, paber ja papp.” Jäätmeseadus liigitab biojäätmed järgnevalt:

“Biojäätmed on järgmised biolagunevad jäätmed:

- 1) aia- ja haljastujäätmed;
- 2) kodumajapidamises, jaemüügikohas ja toitlustusasutuses tekkinud toidu- ja köögijäätmed;
- 3) toiduainetööstuses tekkinud jäätmed, mis on oma koostise ja olemuse poolest samalaadsed käesoleva paragrahvi punktis 2 nimetatud jäätmetega.”. (Jäätmeseadus, 2013)

Käesolevas töös kasutati kompostimiseks kodumajapidamises tekkinud toidu- ja köögijäätmeid, seega punktis 2 loetletud jäätmeid.

Jäätmeseaduses §134 on kehtestatud biolagunevate jäätmete koguse protsendilised piirangud, mis sätestavad, et alates 2010. aasta 16. juulist ei tohi biolagunevaid jäätmeid prügilasse ladestatavate olmejäätmete hulgas olla üle 45 massiprotsendi (%), 2013. aastal üle 30% ja 2020. aastal üle 20% (Jäätmeseadus 2013). Aastatel 2007-2008 Säästva Eesti Instituudi (SEI) poolt teostatud segaolmejäätmete sortimisuuringust selgus neljast prügilast võetud proovist, et biojäätmed moodustavad kõige suurema osa segaolmejäätmetest- Eesti keskmiseks oli 36,6%, millest 29,3% moodustasid köögijäätmed (SEI 2008). Aastatel 2012-2013 samast uuringust kuuest Eesti piirkonnast võetud proovist selgus, et endiselt moodustavad biojäätmed suurima osa olmejäätmetest- 31,8%, millest 26,9% olid köögijäätmed (SEI 2013).

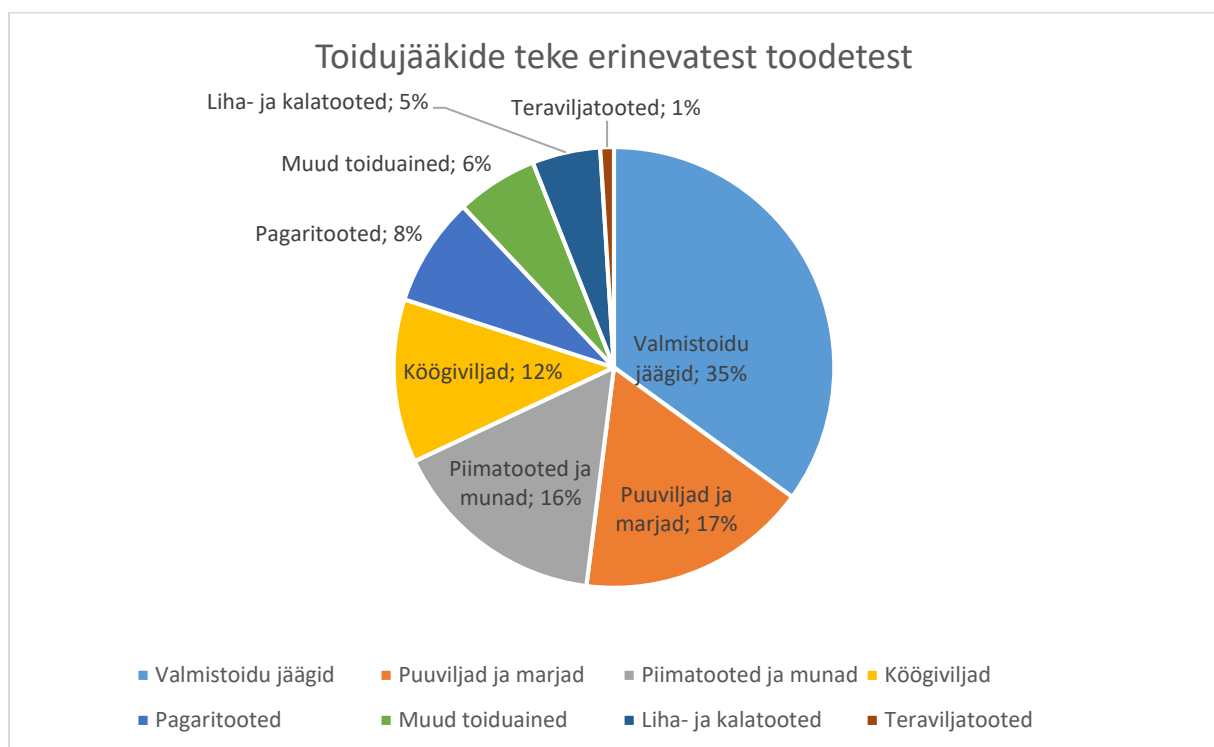
Teostatud uuringutest saab järeldada, et seaduses kehtestatud protsenti aastaks 2010 täideti, aga aastaks 2013 ületati piirangut 1,8 protsendiga. Kehtestatud sihtarvu täitmine nõuab järjekindlat tööd biojäätmete eraldi kogumisel ka elanikkonnalt, samuti peaks see motiveerima fermenteerimisprotsessi (bokashi meetodi) kasutamist koduskompostimisel, et biolagunevad jäätmed ei satuks olmejäätmete hulka.

1.1 Toidujäätmed

SEI 2015. aasta uuringu kohaselt tekib Eestis kodumajapidamistes 54 kg toidujäätmeid aastas ühe inimese kohta, mille hulgas on 19,5 kg toidukadu. Toidukao all mõeldakse valmistoitu, mis jääb üle söömisest või toiduained, mis on riknenud või kasutusaja ületanud. Joonisel 1 on kujutatud toidukadu erinevate toiduainete lõikes. (SEI 2015)

Samuti SEI-s 2008. aastal läbi viidud uuringust selgus, et köögijäätmed moodustavad Eestis keskmiselt 30% ehk 1/3 elanike segaolmejäätmetest (SEI 2008).

2018. sügisest kuni 2019. aasta suveni Tartu linna piires läbi viidud olmejäätmete sortimisuuringust ilmnas, et köögijäätmed moodustavad elanike kogujäätmetest keskmiselt 24%. Kõige enam tekkis köögijäätmeid 2018. aasta talvel, mil olmejäätmetes oli neid 27%. Kui võrrelda protsenti linnajagude vahel, siis suurima hulga köögijäätmeid toodavad keskklinna elanikud ja väikseim köögijäätmete hulk tuleb Variku linnaosast. (Maves 2019)



Joonis 1. Toidujäätmete teke Eestis erinevatest toodetest. (SEI 2015)

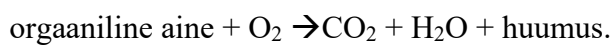
Lisaks kodumajapidamistele on suurteks toiduainete tarbijaks ja toidujäätmete tekitajaks majutusasutused. Eesti Maaülikooli üliõpilase Kristel Murumaa magistritööst „Uuring toidujäätmete tekkimise põhjuste ja vähendamiste võimaluste kohta Tallinna hotellide näitel“ selguvad Tallinna üheksa hotelli toidujäätmete tekkimise põhjused. Intervjuudest tuleb välja, et kõige suurem jäätmetekke on toidu valmistamise etapis, mille käigus tekib kõige rohkem selliseid toidujäätmeid, mida rohkem kasutada ei saa (koored, kondid). Toidujäätmeid tekib ka klientide taldrikutele allesjäänud toiduna ja valmistoiduna, mis päeva lõpuks müümata jääb. Lisaks ollakse valmis serveerima kõiki menüüs olevaid roogi, mille tarbeks tuleb laos hoida paljusid toiduaineid, mille kasutamist pole võimalik täpselt prognoosida ja mistõttu rikneb paratamatult teatud hulk toiduaineid. Toidujäätmete tekke üheks faktoriks võivad olla ka üksikisikud ja ebaprofessionaalsed töötajad, kellel puudub piisav kvalifikatsioon ja kes näitavad üles hoolimatust toidutooraine suhtes. (Murumaa 2018)

Magistritöö intervjuudes personaliga arutleti ka toidujäätmete vähendamise meetmete üle. Kõige olulisemaks peetakse oskuslikku planeerimist, mille all mõeldi nii toidutooraine maksimaalset ärakasutamist kui ka sisseostu- ja valmistatavate toidukoguste optimeerimist. Küsimusele köögis tekkivate jäätmete keskkonnamõjude kohta nähti probleeme pigem pakendites ja plastis ning toodi välja, et toiduainete korrektse käitlemise korral ei kaasne keskkonnamõjusid. Ainult ühe hotelli personal nimetas toidutootmisega kaasnevat maa ülekasutust (Murumaa 2018).

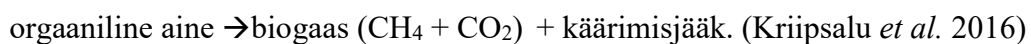
2 BIOKÄITLUSVIISID

Vello Keppart raamatus „Keskkonnakaitse: jäätmekäitus“ on biokäitus defineeritud kui „... bioloogiliste käitlusvõtete sihipärane rakendamine orgaaniliste jäätmete lagundamiseks.“ (Keppart 2011).

Sõltuvalt õhuhapniku osalemisest orgaaniliste jäätmete biokäitluses liigitatakse käitlusviisid aeroobseteks (hapniku juuresolekul) ning anaeroobseteks (hapniku puudumisel). Aeroobsel käitlemisel saadakse orgaanilisest ainest süsihappegaas, vesi ja huumus:



Anaeroobsel käitlemisel (mida nimetatakse ka metaankääritamiseks) on saadusteks biogaas ja käärimisjääk. Skemaatiliselt saab anaeroobset protsessi kirjeldada järgnevalt:



Üks levinumatest aeroobsetest biokäitlusviisidest on kompostimine, mis võrreldes prügilasse ladestamisega paiskab atmosfääri vähem kasvuhoonegaase. Prügilasse ladestatud ühest tonnist prügist lendub õhku keskel läbi 1,287 tonni/CO₂ ekv, aga kui koguda biolagunev prügi eraldi ja seda kompostida, siis on emissiooniks 0,284 tonni/CO₂ ekv. (Lou, Nair 2009).

Sõltuvalt kompostimiskohast võib positiivset efekti anda ka transpordikulude ja prügilahaisuprobleemide vähenemine, samuti prügilates tekkiva nõrgvee väiksem reostuskoormus. Oluline on, et jäätmetes sisalduv orgaaniline süsinik jääks biokäitusprotsessi tulemusel komposti koostisse (huumusena), mistõttu emiteeritakse atmosfääri vähem süsihappegaasi (Keppart 2011, Kriipsalu 2001). Tänapäeval kasutatakse erinevate tehnoloogiatega mitmeid biokäitlusviise. Järgnevates alapeatükkides on antud lühiülevaade kompostimisest kui olmes tekkivate biojätmete enamkasutatavast biokäitluse viisist ning võrreldud seda bokashi meetodil toimuva käitlusega, mis võib anda eeliseid võrreldes tavakompostimisega ning mida on kasutatud antud töö eksperimentaalses osas. Eksperimentaalses töös keskenduti bokashi meetodil toimuvale protsessile kasvuhoonegaaside emissioonidele, et võrrelda neid tavakompostimisel õhku paisatavate gaasikogustega.

2.1 Kompostimine

Kompostimine on aeroobne biokäitlusviis, mida viivad läbi aeroobsed mikroorganismid kindlate tingimuste juures. (El-Haggar 2007)

Alapeatükk tutvustab erinevaid parameetreid ja tegureid, mida jälgida kompostimise juures. Kasutatud on materjali Mait Kriipsalu, Aleksander Maastiku ja Jaak Truu koostatud raamatust “Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine”.

Kompostimist mõjutavad mitmed parameetrid. Kõige olulisem on jäätmete **biolagunevus**, mis määrab, kui hästi materjal mikroorganismide abil laguneb. Jäätmed võivad sisaldada kergesti lagunevaid ained, näiteks süsivesikuid, aga ka raskesti lagunevaid aineid nagu rasvu ja tselluloosi. Toidujäätmetest laguneb kompostimisel kergesti ca 60 % materjalist. Kompostimisel mängib olulist rolli **niiskus**. Optimaalseks niiskusesisalduseks kompostitavas materjalis on 45-65 % ja kui niiskuse protsent jääb sellest madalamaks, bioloogiline lagunemine lakkab. Ülemäärane vesi (üle 65 %) tõrjub õhu pooridest välja ja komposteeruv mass muutub anaeroobseks. Kompostimise õnnestumine sõltub suurel määral **hapnikust**. Protsessi algaasis peab kompostimise käivitumiseks olema hapnikku rohkem võrreldes protsessi lõppfaasiga. Komposteeruva materjali perioodiline läbisegamine aitab varustada komposti hapnikuga, kuid tuleb silmas pidada, et segamisega kaasneb soojuskadu ja lagugaaside lendumine. **Temperatuur** on kompostimisel oluline tegur, sest on otseses seoses mikroorganismide elutegevusega. Külmas kompostis mikroorganismide elutegevus lakkab, aga temperatuuridel üle 20 °C muutuvad nad elujõuliseks ning nende aktiivsus kahekordistub iga kümne kraadiga. Kompostimise käigus muutub materjali temperatuur ja kujunevad välja järgmised faasid:

- Mesofiilne algaas kestab kuni viis päeva ja selle jooksul alaneb pH, komposteeruv mass soojeneb ja mikroorganismid paljunevad jõudsalt.
- Termofiilses faasis tõuseb temperatuur kiiresti ning mõne päevaga saavutab kompostitav materjal temperatuuri 60-70 °C. Kahjulikud mikroorganismid, taimekahjurid ja parasiidid hukkuvad.
- Mesofiilne küpsemisfaas on stabiliseerumisfaas, kus temperatuur püsib 35-50 °C piires ja toitained on ammendatud.
- Jahtumis- ja järelvalmimisfaasis väheneb mikroorganismide mikrobioloogiline aktiivsus, temperatuur ei tõuse üle 40 °C ja moodustub huumus, toitained muutuvad taimedele kättesaadavaks.

Kompostimisel on tähtis kompostitava materjali sobiv **pH**, mis on tavaliselt vahemikus 6 – 7,5. Süsinikdioksiid hakkab eralduma, kui materjal muutub happelisest aluseliseks. Kõige enam

eraldub süsihappegaasi termofiilses faasis. pH-d saab vajadusel reguleerida lubja ja tuhaga, kuid ei ole enamasti soovitatav, sest pidurdab mikroorganismide elutegevust.

Lisaks eelnimetatutele teguritele on oluline näitaja kompostitava materjali **poorsus**, mis peaks olema 20-35 %. Komposti valmimise kiirust mõjutab ka materjali tükisuurus – mida väiksemad tükid, seda kiiremini kompost valmib. Näiteks aunkompostimisel peaks tükisuurus olema kuni 8 cm.

Süsiniku ja lämmastiku suhe (sümbolites väljendatuna C/N) on oluline mikroorganismidele, kes sõltuvad kompostitava materjali toitainete sisaldusest. Soodne C/N vahekord kompostimiseks on (25-30) : 1. Kui lämmastikku on liias, tekib protsessi käigus ammoniaak ning mikroorganismide bioloogiline aktiivsus langeb. Lämmastiku puudujääk põhjustab temperatuuri languse kompostitava materjali sees ning protsess aeglustub. Toidujääkides on C/N suhe 15, juurviljajäätmes 13 ja puuviljajäätmes 35. Valmiskompostis peaks C/N suhe olema 12-20, aga kui see on suurem, siis jätkub lagunemine ka mullas, mis toob kaasa mullalämmasiku kao. **Tugiaineid** lisatakse kompostitavale materjalile, et suurendada poorsust, vähendada niiskust ja reguleerida C/N suhet. **Lisandeid** kasutatakse toor- või valmiskomposti juures, mis kiirendavad kompostimist ja parandavad produkti kvaliteeti. Tavaliselt toidujäätmete kompostimisel tugiaineid ega lisandeid ei kasutata.

Kompostitav materjal ei tohi sisaldada **inhibiitoreid** ega **mürke**, mis pidurdavad bioloogilisi protsesse. Kompostil on oma **elustik**, mis koosneb bakteritest, seentest ja muudest mulla-asukatest. Kompostist on leitud termofiilseid, lämmastikku siduvaid, ammooniumi ja nitriteid oksüdeerivaid mikroorganisme.

Kompostimismeetodid jagatakse mahu poolest kaheks kategooriaks: koduskompostimine ja tööstuslik kompostimine. Koduskompostimine ehk väikekompostimine on iseloomulik peamiselt eramajadele ja toimub välitingimustes. Jäätmeid kompostitakse seal, kus need tekivad. Meetodeid, kuidas ja kus kompostida, on erinevaid, näiteks võib välja tuua kolm põhilist kompostimisviisi:

- Kompostihunnik;
- Kompostikast;
- Komposter.

Tööstuslikult kasutatakse põhiliselt kahte kompostimismeetodit, aun- ja reaktorkompostimist, millest esimene on enamlevinud. Mõlemal meetodil on nii eeliseid kui puudusi.

Aunkompostimisel tehakse kompostitavast materjalist aunad, mille kõrgus on 1,2 - 2 m, laius maapinnal 3 – 5 m ja pikkus sõltub kasutatava maa-ala suurusest. Oluline on komposti regulaarne segamine, sest see ühtlustab niiskust, aitab lagugaasil lenduda, soodustab bakterite elutegevust ja rikastab komposti õhuhapnikuga. Aunade läbisegamine peab olema optimaalne, et kiirendada kompostimisprotsessi ning samas mitte rikkuda kompostimistingimusi, sest segamisel langeb mõnevõrra materjali temperatuur. Sageli kaetakse aunad valmiskomposti kihiga, mis kaitseb auna kuivamise eest ja aitab säilitada ühtlast temperatuuri.

Reaktorkompostimine sobib piirkondadesse, kus ei ole suurt maa-ala kasutada ja tuleb minimeerida kompostimisprotsessi lagugaaside levikut. Segamine, õhustamine, niisutamine ja soojendamine toimub suletud reaktoris. (Kriipsalu *et al.* 2016)

2.1.1 Kompostimisel eralduvad kasvuhoonegaasid

Jäätmete bioloogilisest käitlemisest tulenevate kasvuhoonegaaside emissioonid on kliima soojenemise seisukohast olulisel kohal. Bioloogilistest protsessidest eralduvat süsihappegaasi ei loeta globaalse soojenemise põhjustajaks, sest see süsinik on juba eelnevalt olnud bioloogiliselt seotud. Küll aga diämmastikoksiid ja metaan panustavad oluliselt kliima soojenemisse, sest nende infrapunase kiirguse absorbeerimisvõime on süsinikdioksiidist vastavalt 235 ja 25 korda suurem. (Sánchez 2015)

Metaan (CH_4) eraldub orgaaniliste jäätmete anaeroobsel lagunemisel kompostimisprotsessi algstaadiumis. Isegi normaalselt õhustatud kompostihunnikus on anaeroobseid või anoksilisi piirkondi, kus metaan võib tekkida. Kõige rohkem tekib kompostimisel metaani hapnikupuuduse, kõrgete temperatuuride ja suure niiskusesisalduse juures, sest siis metanogeensed bakterid saavad paljuneda ja nende aktiivsus suureneb. (Sánchez-Monedero 2010)

Dilämmastikoksiid (N_2O) on kõrvalprodukt kompostimisel toimuvatel protsessidel, aeroobsel nitrifikatsioonil ja denitrifikatsioonil. Aeroobne nitrifikatsioon hõlmab endas ammoniaagi esialgset oksüdeerimist nitritiks erinevate bakterite sugukondade (*Nitrosomonas* ja *Nitrososporas*) abil ja nitritite oksüdeerimist nitraatideks (*Nitrobacter*). Denitrifikatsioon on lämmastikuühendite lagunemine, mis toimub kompostimise algfaasis, kus samuti eraldub dilämmastikoksiid. (Sánchez-Monedero 2010)

Nii metaani kui ka dilämmastikoksiidi emissioonid sõltuvalt kompostitava materjali ja lisasubstraatide omadustest, mis määravad lagunemiskiiruse ja süsiniku ning lämmastiku kättesaadavuse protsessi jooksul, mistõttu tuleks konkreetsete materjalide kasvuhoonegaaside

heitkoguste kvantifitseerimist hinnata erinevates tingimustes, et vähendada nende keskkonnamõju. (Sánchez-Monedero 2010)

Toidujäätmete kompostimisel eralduvate dilämmastikoksiidi ja metaani heitkoguseid mõõdeti aastal 2000. Jaapanis tehtud katses. Katse algmaterjaliks võeti keskmise jaapanlase ühe päeva jooksul tekkivad kana-, kala-, õuna-, banaani-, viinamarjade-, kapsa-, porgandi-, riisi- ja teejäätmel, mis paigutati 80-ks päevaks õhustatavatesse automaatreaktoritesse ning mõõdeti metaani ja dilämmastikoksiidi sisaldust reaktorites. Metaaniteke katse jooksul oli madal ning metaani kontsentratsioonid reaktorites ei ületanud selle kontsentratsiooni välisõhus (2,06 ppmv). Dilämmastikoksiidi keskmine kontsentratsioon reaktorites oli selle aja vältel 0,53 ppmv (välisõhus 0,45 ppmv), mis ületas 15%-ga välisõhu näitajat. (He 2000)

2.2 Kompostimine bokashi meetodil

Bokashiks nimetatakse lagunenu orgaanilist materjali, mille valmimisele on kaasa aidanud efektiivsete mikroorganismide segu (Abdul Aziz 2019). Bokashi kompostimine on üks jäätmete biokäitlusviisidest, mis koosneb kahest etapist: fermenteerimisprotsessist ja järelvalmisprotsessist. Teine etapp toimub siis, kui bokashi kompost on mulda viidud. (Footer 2014) Fermenteerimine toimub anaeroobselt, mille käigus mikroorganismid lagundavad keerulise ehitusega orgaanilisi ühendeid happelises keskkonnas. Sõna „*bokashi*“ tuleb jaapani keelest ja tähendab tõlkes „hea kääritatud orgaaniline aine“. (Bosch *et al.* 2020)

Fermenteerimine ehk kääritamine on anaeroobne protsess, mida viivad läbi anaeroobid, kes vajavad elutegevuseks suhkruid, tärklisi ja valke. Kõige keerulisemad ühendid, mida anaeroobsed organismid suudavad lõhustada on tselluloos ja ligniin. Kui kompostimisel on oluline C:N suhe, siis fermenteerimisele aitab kaasa pigem lihtsamate ühendite osakaal kääritatavas materjalis. See teebki toidujäätmetest fermenteerimiseks sobiva algmaterjali, ehkki C:N suhe on toidujäätmete puhul 10:1, mis ei ole näiteks tavakompostimisel parim. (Merfield 2013)

Aeroobses kompostimisprotsessis osalevad mikroorganismid on keskkonna loomulik osa, mistõttu pole vajadust neid kompostimisel lisada. Fermenteerimisprotsessi viivad läbi anaeroobsed mikroorganismid, keda keskkonnas tavatingimustel ei esine, mistõttu tuleb neid käärimissegule lisada. (Merfield 2013) Selleks on välja töötatud spetsiaalne efektiivne mikroorganismide segu, mida lisatakse kompostrisse vaheldumisi toidujäätmetega ja mida

nimetatakse bokashi kliideks. Protsess on kiire (tavaliselt 2-3 nädalat) ja lõhnatu, saadud materjal on toitaineerikas ning kasutamisel valmis. (Footer 2014)

Bokashi kliisid (bokashi bran) saab osta poest või valmistada ise. Valmistamisretsepte on erinevaid, aga põhikomponentideks on sobivad mikroorganismid, melass, vesi ja riisi- või nisukliid. Mikroorganismidena kasutatakse nt piimhappebaktereid, fotosünteesivaid baktereid, aktinomütseete, pärme ja seeni, kes lagundavad jäätmeid ja parandavad saadava komposti ja järelvalmimisprotsessis ka mulla omadusi. (Higa, Parr 2020)

Bokashi kompostimine sobib hästi piiratud alaga siseruumidesse, sest komposter on väike (nt 23 L), ei eralda ebameeldivat lõhna ja on lihtne kasutada. Kompostri allosas on kraan, mille kaudu saab välja lasta kompostitavast materjalist eralduvat vedelikku, mis on samuti toitaineerikas. (Jouhara *et al.* 2017) Lisas 1 (foto 1) on toodud eelnevalt kirjeldatud kompostrit illustreeriv pilt.

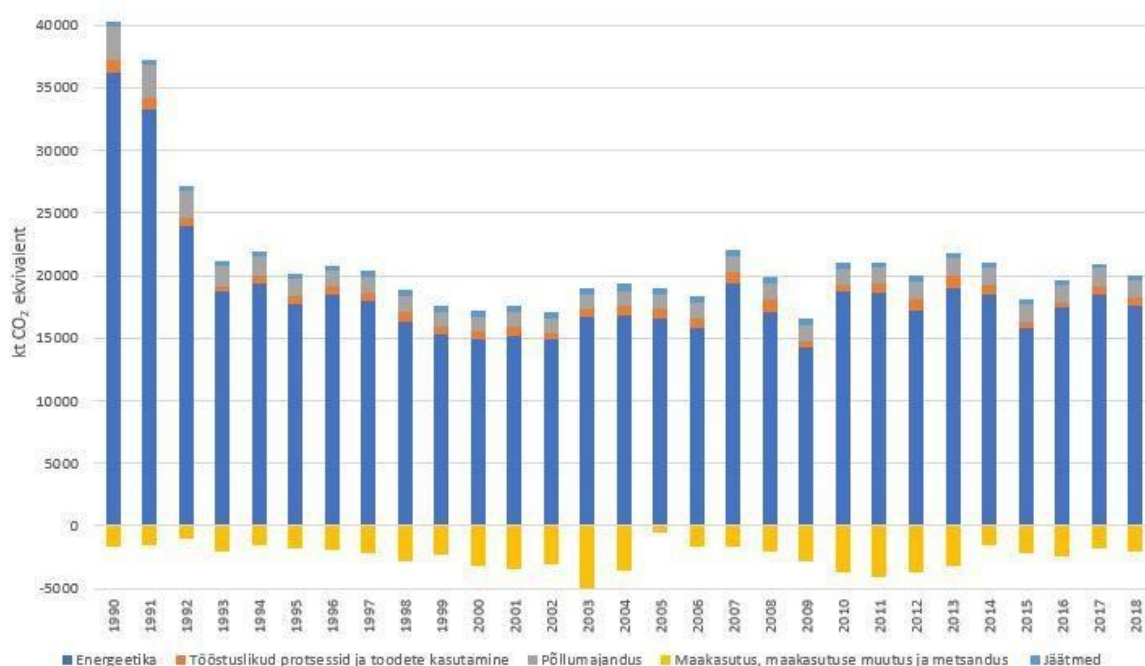
Kasvuhoonegaaside emissioon on kirjanduse andmetel bokashi kompostimisel väiksem kui tavakompostimisel. Hollandis läbiviidud uurimuses kaheaastase katseperioodi jooksul selgus, et samades kogustes kompostimisel bokashi meetodiga lisandus atmosfääri 166 kg CO₂ ekvivalenti ja tavakompostimisel 3305 kg CO₂ ekvivalenti kasvuhoonegaase, seega erinevus kahe meetodi vahel on 20-kordne. Kahte meetodit võrreldi ka orgaanilise materjali, süsiniku- ja lämmastikukadude osas. Mõõtmised näitasid, et teise aasta lõpuks oli bokashi meetodiga toodetud kompostis orgaanilise materjali vähenemine 4,8 % samas kui tavakompostimisel oli vähenemine 48 %. Kümnekordne erinevus oli kahe kompostimismeetodi vahel ka süsiniku- ja lämmastikusisalduse vähenemises valmis kompostis. (Bosch *et al.* 2020)

3 KASVUHOONEGAASIDE KOGUSED EESTIS

Väikeriigina on Eesti kasvuhoonegaaside emissioon absoluutväärtusena arusaadavalt väike, näiteks 2018. aastal paisati Eesti kohal õhku 20 miljonit tonni¹ kasvuhoonegaase (CO₂-ekvivalents), mis moodustab Euroopa Liidu liikmesriikide heitkogusest 0,5 % (Keskkonnaministeerium 2020a). Paraku on Eesti kasvuhoonegaaside heide elaniku kohta üks Euroopa Liidu suurimaid. 2017. aastal oli Eurostati andmetel Euroopa Liidu keskmine kasvuhoonegaaside heitkogus inimese kohta 8,7 tonni CO₂-ekv, samal ajal kui Eestis 15 tonni CO₂-ekv. (Masing 2019).

Summaarsest kasvuhoonegaaside kogusest moodustab enamuse süsihappegaas (89 % ehk 17,7 miljonit tonni CO₂). Metaan ja diämmastikoksiid on vastavalt teisel ja kolmandal kohal, vastavalt 6 % ning 5 %. Kõige väiksem osakaal on F-gaasidel (fluoritud kasvuhoonegaasid), mis moodustavad 1 % koguheitest. (Keskkonnaministeerium 2020a)

Joonisel 2 on kujutatud tulpdiagrammina Eesti kasvuhoonegaaside heitkoguseid kilotonnides tekkekohtade lõikes aastatel 1990-2018.

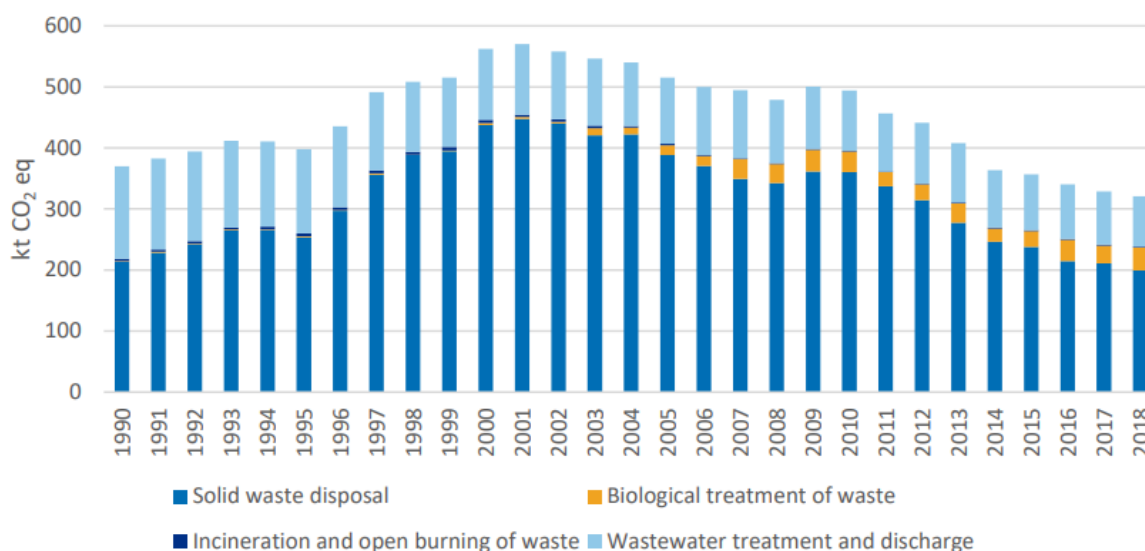


Joonis 2. Kasvuhoonegaaside emissioonid (kilotonnides) tegevusvaldkondade lõikes Eestis aastatel 1990-2018. (Keskkonnaministeerium 2020a)

¹ Metsa- ja maakasutussektori süsinikdioksiidi sidumisvõimet ei ole arvestatud. Kui seda arvestada, on netokoguseks 17,9 miljonit tonni.

Energeetikasektori heide tekib kõigist kasutatud kütustest ja on Eestis suurim (88 % emissioonist). Käesoleva töö kontekstis on oluline väikseim heiteallikas, jäätmed. Jäätmekäitluse valdkond emiteerib 1,6 % kasvuhoonegaasidest, millest 2/3 on prügilagaas. (Keskkonnaministeerium 2020b)

Tahkete jäätmete biokäitlemisel (kompostimisel) tekib Eesti kasvuhoonegaaside koguheitest 0,2 %. Jooniselt 3 selgub, et ajavahemikus 1990 – 2018 on jäätmete biokäitlusega seotud kasvuhoonegaaside emissioonid suurenenud. Kui aastal 1990 eraldus metaani 0,03 kt, siis 2018 eraldus pea 30 korda rohkem, 0,87 kt CH₄. Dilämmastikoksiidi emissioon oli 1990. aastal 0,002 kt, 2018. aastal juba 0,052 kt N₂O. Alates aastast 2001 on kasvuhoonegaaside teke vähenenud, kuna biojätmeid hakati eraldi koguma ja käitlema. (Keskkonnaministeerium 2020b)



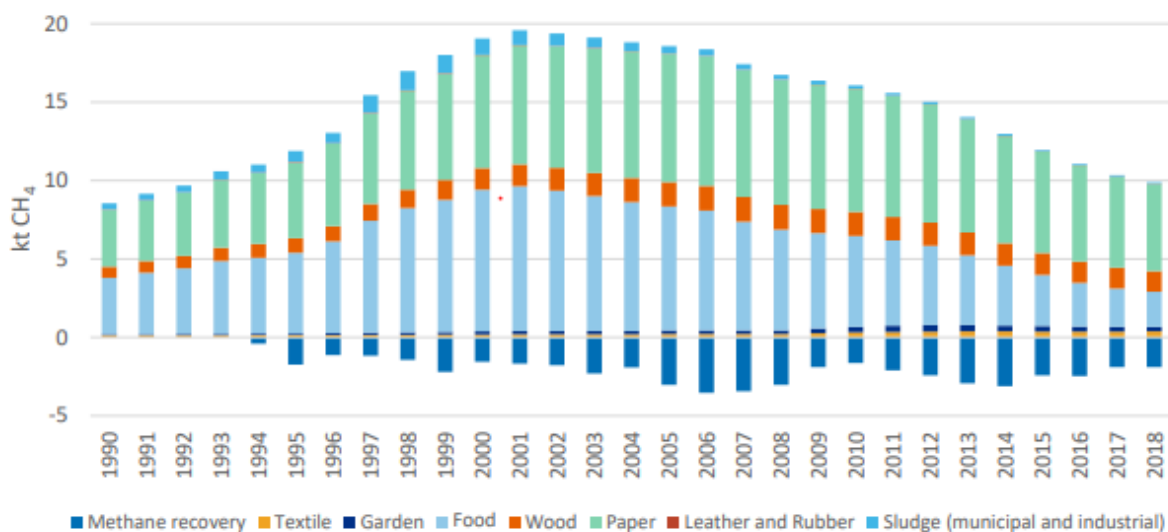
Joonis 3. Kasvuhoonegaaside emissioonid Eesti jäätmesektorist käitlemisviiside kaupa aastatel 1990-2018.

2018. aastal kompostiti Eestis 86 593 tonni biolagunevaid jäätmeid, millest 4 473 tonni (5 %) moodustasid toidujäätmed. Prügilasse ladestatud toidujäätmete kogus samal aastal oli 24 100 tonni, mis moodustas olmejäätmete kogumassist (86 200 tonni) 28 %. (Keskkonnaministeerium 2020b)

Prügilagaas moodustub biolagunevate jäätmete anaeroobsel lagunemisel. Mida rohkem ladestatakse biolagunevaid jäätmeid prügilasse, seda suuremad on sealt ka kasvuhoonegaaside

emissioonid. Prügilagaasi koostises on 53 % metaani, 34 % süsihappegaasi, 10 % lämmastikku ja vähemal määral teisi gaasilisi aineid. Prügilagaas on tervisele ohtlik, sisaldab kantserogeene ja on plahvatusohtlik. (Anderson 2014, Sellik 2014)

Kuna metaan moodustab suure osa prügilagaasist, siis on selle päritolu põhjalikumalt uuritud. Aastal 2018 eraldus prügilatest 7,98 kt metaani, millest 2,2 kt pärines toidujäätmete lagunemisel tekkinud metaangaasist. Joonisel 4 on toodud prügilasse ladestatud biolagunevatest jäätmetest tekkiva metaani emissioonide osakaalud erinevatest tekkeallikatest kilotonnides aastatel 1990-2018. (Keskkonnaministeerium 2020b)

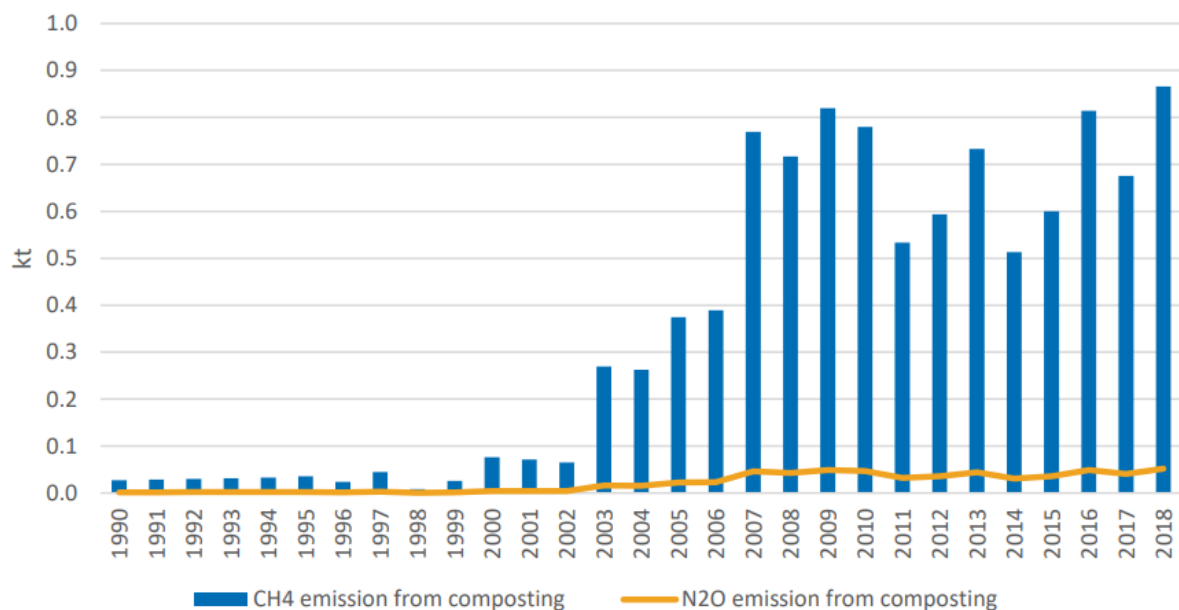


Joonis 4. Eesti prügilatest eralduva metaani kogused tekkeallikate põhjal 1990-2018. (Keskkonnaministeerium 2020b)

Toidujäätmetest, mis on prügilatesse ladestatud, on viimase 10 aasta jooksul metaaniteke prügilates tublisti vähenenud (ca 2 korda), mis kindlasti on toidujäätmete liigitikogumise aktsiooni tulemus, sest elanikkonnalt ja toitlustusasutusest liigitikogutud toidujäätmeid kompostitakse ja neid satub prügilasse väiksemas mahu. Kuna toidujäätmete liigitikogumist ei tehta hajaasustuse ja väikeelamute piirkondades, saab bokashi kompostimine tõhusalt kaasa aidata kodudes tekkivate ja seni prügilasse sattuvate toidujäätmete koguste vähendamisele.

Joonisel 5 on tulpdiagrammina esitatud kompostimisel tekkivad metaani ja diämmastikoksiidi emissioonid aastatel 1990-2018. Aastal 2018 oli CH₄ emissioon vaadeldud perioodi kõrgeim

(870 tonni), samuti N₂O emissioon (ca 50 tonni), mis on jäänud stabiilseks alates 2007. aastast. (Keskkonnaministeerium 2020b)



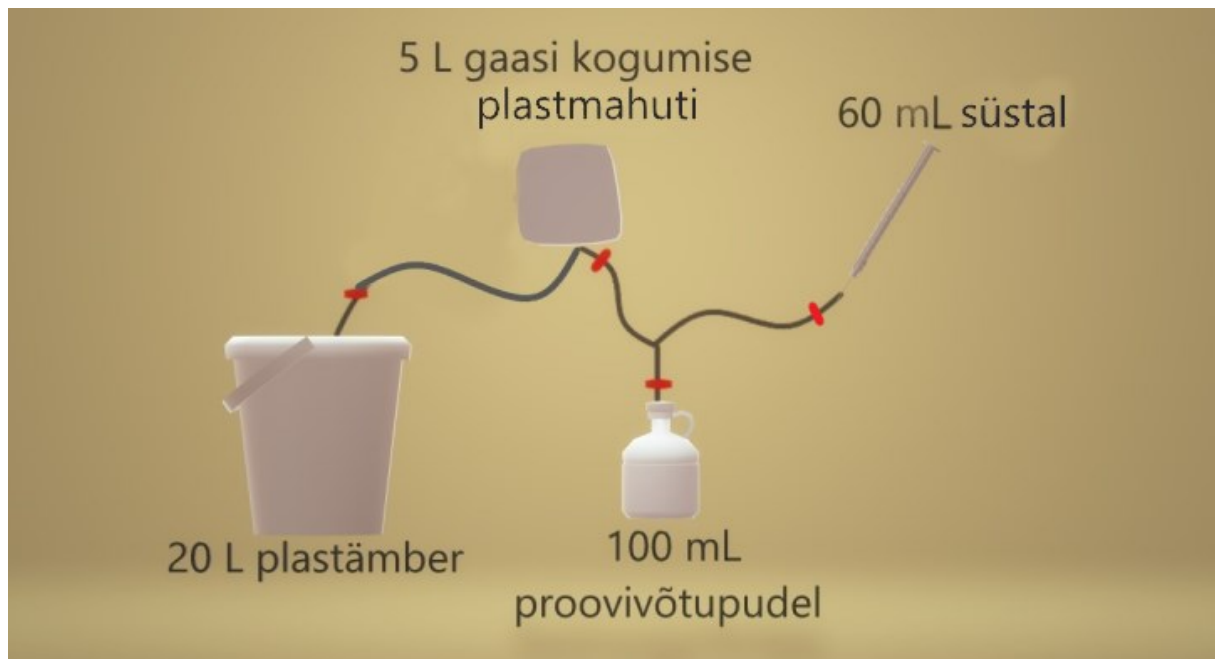
Joonis 5. Metaani ja diämmastikoksiidi emissioonid Eestis tahkete jäätmete biokäitlusest aastatel 1990-2018. (Keskkonnaministeerium 2020b)

Keskkonnaministeeriumi poolt läbiviidud uuringust 2018. aastal selgus, et võrreldes aastaga 2001 on jäätmete prügilasse ladestamine vähenenud üle kahe korra ja sellega paralleelselt on langenud ka prügilatest eralduva metaani kogused samavõrra. Kompostimisest tekib 0,2 % kogu kasvuhoonegaasidest Eestis. 5 % (4473 tonni) kogu kompostitavast materjalist moodustasid toidujäätmed, mis tähendab, et iga inimene panustab toidujäätmete kompostimisse ainult 3,36 kilogrammiga aastas samal ajal kui SEI 2015. aasta uuringu kohaselt tekib iga inimese kohta 54 kg toidujäätmeid aastas (SEI 2015). Sellest aspektist vaadatuna võib bokashi kompostimine pakkuda tohutu võimaluse elanikel ise panustada oma toidujäätmete käitlemisse kuna meetod on lihtne, kiire ning haisuvaba, sobides kasutamiseks ka kodustes tingimustes. Käesoleva töö raames pakkus töö autorile huvi, milline on bokashi kompostimise kasvuhoonegaaside emissioon, sest kliimaneutraalsusele pürgivas ühiskonnas tuleks rakendada ka kompostimisel selliseid meetodeid, mis lisaksid atmosfääri väiksemas koguses kasvuhoonegaase võrreldes tavakompostimisega.

4. EKSPERIMENTAALNE OSA

Käesoleva bakalaureusetöö eksperimentaalse töö eesmärgiks oli uurida kompostimist bokashi meetodil kasvuhoonegaaside emissioonide tekke seisukohalt, töötada välja lihtne katseseade, mis võimaldaks kahe nädala jooksul mõõta kompostimise käigus eralduvate gaaside (CO_2 , N_2O ja CH_4) koguseid ning kontsentratsioone. Kuna bokashi meetodil toimub kompostitava materjali lagundamine bokashi kliide abil, mis sisaldab sobivaid mikroorganisme anaeroobsetes tingimustes, siis fermentatsiooniprotsess toimub kiiresti (kahe nädala jooksul) ning selle gaasitekke võrdlust aeroobse kompostimisprotsessiga ei olnud käesoleva bakalaureusetöö raames ajaliselt ja tehniliselt võimalik läbi viia. Saadud kasvuhoonegaaside emissioonide mõõtmistulemusi saab võrrelda kirjanduses toodud andmetega. Bokashi meetodil valmib kompost lühikese ajaga ja selle orgaanilised komponendid on taimedele kergesti omandatavad, mistõttu eeldatavalt ei toimu kasvuhoonegaaside märkimisväärset eraldumist pärast selle komposti viimist mulda.

Töö eksperimentaalses osas viidi läbi kaks katseperioodi samades tingimustes (toidujäätmete fermenteerimine toatemperatuuril 23-24°C plastämbris, kuhu oli kompostitavale materjalile lisatud kihiti bokashi kliisid). Esimene katseperiood oli planeeritud eelkatsena metoodika ja proovivõtusüsteemide kontrollimiseks, teine katseperiood teostati kahe ämbriga, milles oli ühesuguse koostisega kompostitav materjal (peamiselt toidujäätmed), kuid ühte ämbrisse lisati kihiti bokashi kliisid, teise mitte. Gaasitekke mõõtmine toimus mõlemast anumast, et kindlaks teha, kui efektiivselt toimub fermentatsioon samadel tingimustel bokashi kliidega ja ilma. Kompostimine viidi läbi õhukindlalt kaanega suletud plastämbrites ($V = 20$ liitrit, $\varnothing 32$ cm), mis oli varustatud proovivõtu voolikute komplektiga. Fermentatsiooniprotsessis eraldunud gaasi kogumiseks kasutati plastmahutit (mahlapakend, ruumala ~ 5 liitrit). Katseseade gaasi kogumise režiimis on fotol 2 lisas 1. Gaasiproovide eraldamiseks olid kasutusel eelvakumeeritud (0,3 mbar) 100 mL klaasist proovivõtupudel ja süstal (60 mL) (vt foto 3 lisas 1). Katseseadet on skemaatiliselt kujutatud joonisel 6.



Joonis 6. Bokashi kompostimiseks koostatud katseseadme skeem.

Eksperimenti jaoks vajalik kompostitav materjal – toidujäätmed – saadi Tartu Ülikooli Chemicumis tegutsevalt tootlustusettevõttelt OÜ Meritar&Co. Eelkatses kasutatud kompostitav materjal oli põhiliselt värskete köögiviljade töötlemisel tekkinud toorjääde. Teise eksperimenti tarbeks koguti ettevõttes tekkivaid toidujäätmeid liigiti (valmistoidu jäägid, toorjäätmek ja kohvimasina jääk). Kompostitava materjali kaalumise toimus laboris ja selleks kasutati kaalu Kern KFS-T (mõõtepiirkond 0-50 kg, mõõtemääramatus $\pm 0,5 \%$).

Katseperioodi jooksul võeti iga päev gaasiga täitunud plastmahutist proovivõtupudelitesse 3 gaasiproovi. Kogutud proovid analüüsiti Shimadzu GC-2014 gaaskromatograafia Tartu Ülikooli geograafia osakonna laboris. CO_2 ja N_2O sisaldus proovides määrati elektronpüüde-detektoriga (ECD - *electron capture detector*) ja CH_4 sisaldus leek-ionisatsiooni detektoriga (FID - *flame ionization detector*). Kromatograafi mõõtemääramatus vastavates mõõtepiirkondades on $\pm 2 \%$ mõõdetud tulemuse väärtusest.

Mõlema katseperioodi jooksul mõõdeti igapäevaselt eraldunud gaasi ruumalad, milleks kasutati süstalt $60 \pm 1 \text{ mL}$.

Gaasiproovide võtmine proovivõtupudelitesse koos gaasikoguste mõõtmisega toimus järgmise eeskirja kohaselt (vt skeemi joonisel 6 ja fotosid 2 ja 3 lisas 1):

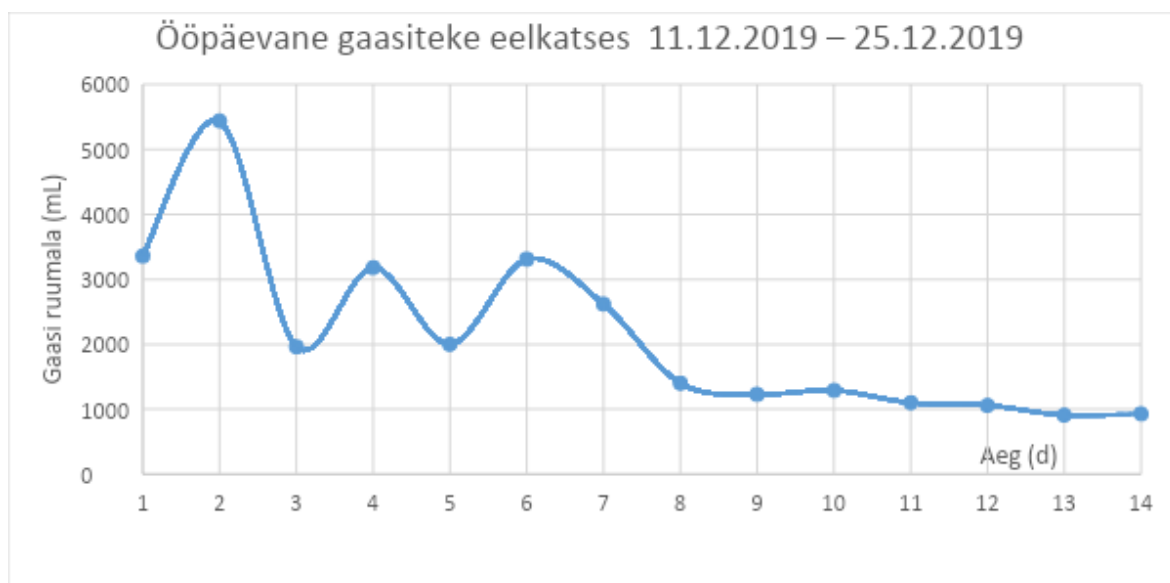
1. Sulgeda plastämbri kaane küljes oleva vooliku kraan (voolik oli ühendatud plastmahutiga, kuhu eraldunud gaasi koguti).
2. Ühendada proovivõtupudel süsteemi vooliku küljes oleva spetsiaalse otsikuga.
3. Tühjendada süstlaga voolikud eelmisest gaasiproovi jäägist.
4. Avada torukolmikul ja proovivõtupudeli küljes olevad kraanid kolmeks sekundiks, et gaas saaks minna plastmahutist proovivõtupudelisse ning seejärel sulgeda mõlemad kraanid ja eemaldada proovivõtupudel.
5. Ühendada süsteemi teine proovivõtupudel ning korrata sama protseduuri. Seejärel ühendada süsteemi kolmas proovivõtupudel.
6. Korrata proovivõttu, sulgeda proovivõtupudeli juures olev kraan, aga proovivõtupudelit mitte eemaldada.
7. Tühjendada süstlaga gaasi kogumise pakend gaasist ja seejärel eemaldada kolmas proovivõtupudel. Süstlaga (60 mL) plastmahutist väljavõetud gaasi koguste põhjal leiti katseseadmest ööpäeva jooksul eraldunud gaasi ruumala, millele lisandus kolme proovivõtupudeliga süsteemist eraldatud gaasi ruumala.
8. Sulgeda torukolmiku juures olevad kraanid, avada plastämbri küljes oleva vooliku kraan ja alustada uuesti gaasi kogumist plastmahutisse.

4.1 Eelkatse

Eelkatse teostati ühe plastämbri ajavahemikus 11.12.2019 – 25.12.2019 (14 päeva). Kompostitavaks materjaliks olid värsked porgandi, kaalika ja lillkapsa ettevalmistuse jäägid, millele lisati väikestes koguses kohvimasina jääki, puulehti ja värsket valmissalatit (foto kasutatud toorjäätmest on toodud lisas 2, foto 4). Eelkatses kompostitavate materjalide koguseid separaatselt ei kaalutud, plastämbrisse lisatud bokashi kliide kogus oli 200 grammi, mis pandi kihiti kompostitava materjaliga (vt fotot 5 lisas 3). Kompostitava materjali algkaal (koos bokashi kliidega) oli 11,13 kg. Eelkatse jooksul (14 päeva) vähenes kompostitava materjali kaal 60 grammi.

4.1.1 Eelkatse tulemused

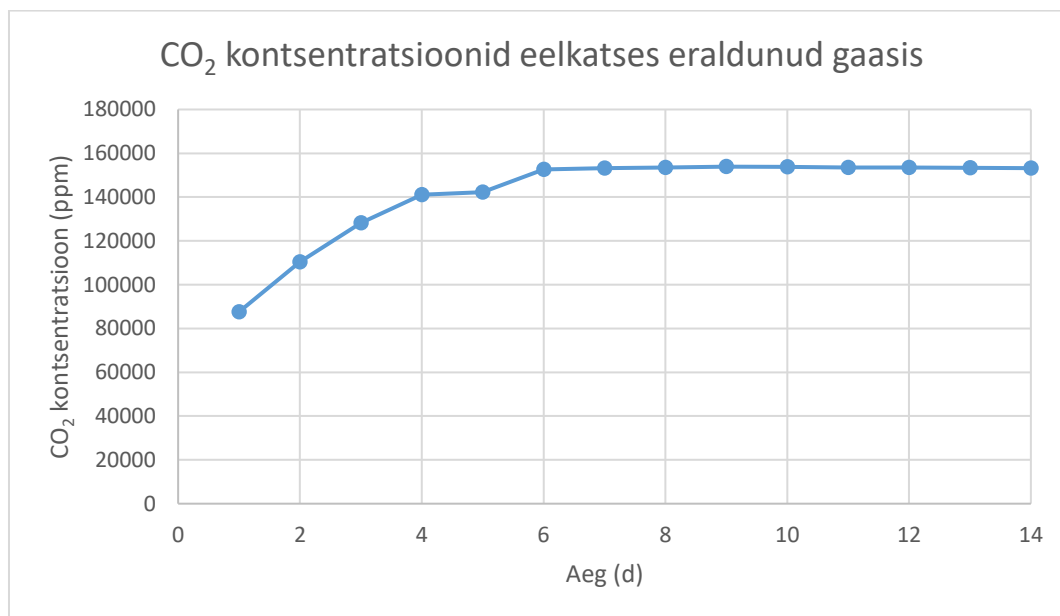
Eelkatses eraldus kompostitava materjali fermenteerimise käigus bokashi kliidega 14 päeva jooksul 29,19 liitrit gaasi. Iga päev kell 14 võeti 3 gaasiproovi ning tühjendati süstlaga gaasikogumise plastmahuti (selle kaudu on määratud ööpäevane gaasiteke). Joonisel 7 on esitatud 14 päeva jooksul mõõdetud ööpäevased gaasi ruumalad, mis fermentatsioonil eraldusid. Seitsme esimese päeva jooksul oli gaasiteke ebastabiilne, kuid kogused olid suuremad kui 2 liitrit, alates kaheksandast päevast on gaasiteke stabiliseerunud ning jäi tasemele ca 1 liiter ööpäevas.



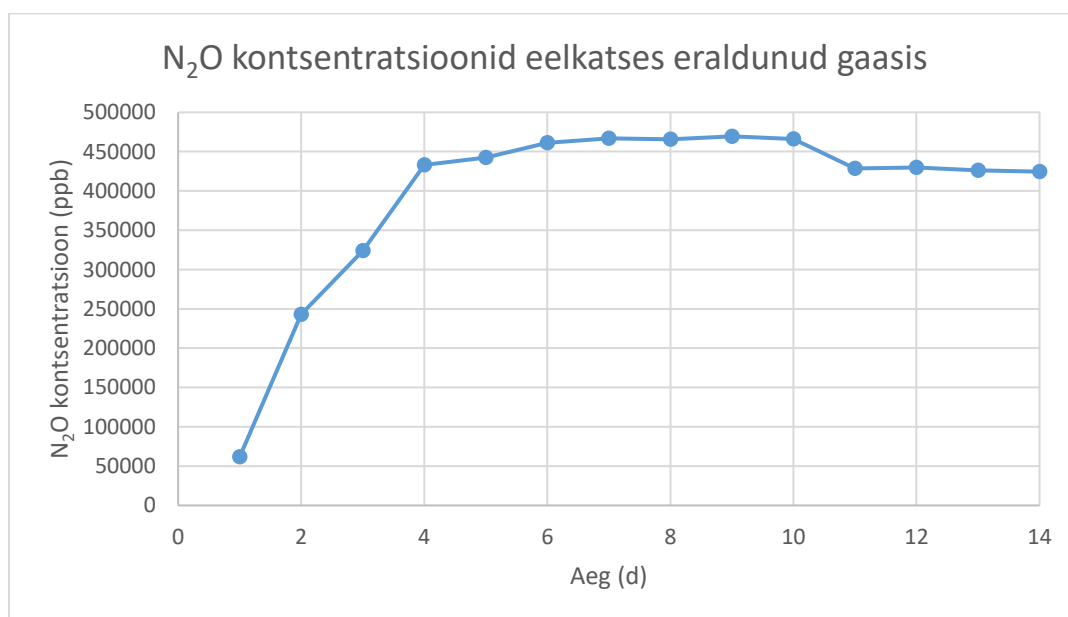
Joonis 7. Ööpäevane gaasiteke biojäätmete fermenteerimisel bokashi meetodil eelkatses.

Pärast kahe nädala gaasiproovide kogumist mõõdeti gaaskromatograafia süsinikdioksiidi, diämmastikoksiidi ja metaani kontsentratsioonid kõikidest proovivõtupudelitest. Kokku võeti süsteemist 42 proovi, millest nelja proovi analüüsi ei saanud teostada ebapiisava gaasikoguse tõttu. Enne kompostimist võeti ka võrdlusproov labori siseruumi õhust, mis sisaldas 604 ppm süsinikdioksiidi, 332 ppb diämmastikoksiidi ja 2056 ppb metaani. Kui diämmastikoksiidi ja metaani sisaldused laboriõhus on atmosfääriõhuga suhteliselt heas kokkulangevuses (vastavalt 300 ppb N_2O ja 1800 ppb CH_4), siis analüüsil saadud CO_2 sisaldus laboriõhus ületas (ca 1/3 võrra) süsihappegaasi sisaldust atmosfääris (400 ppm CO_2). See võib olla põhjustatud siseruumide vähesest õhustamisest talvisel perioodil.

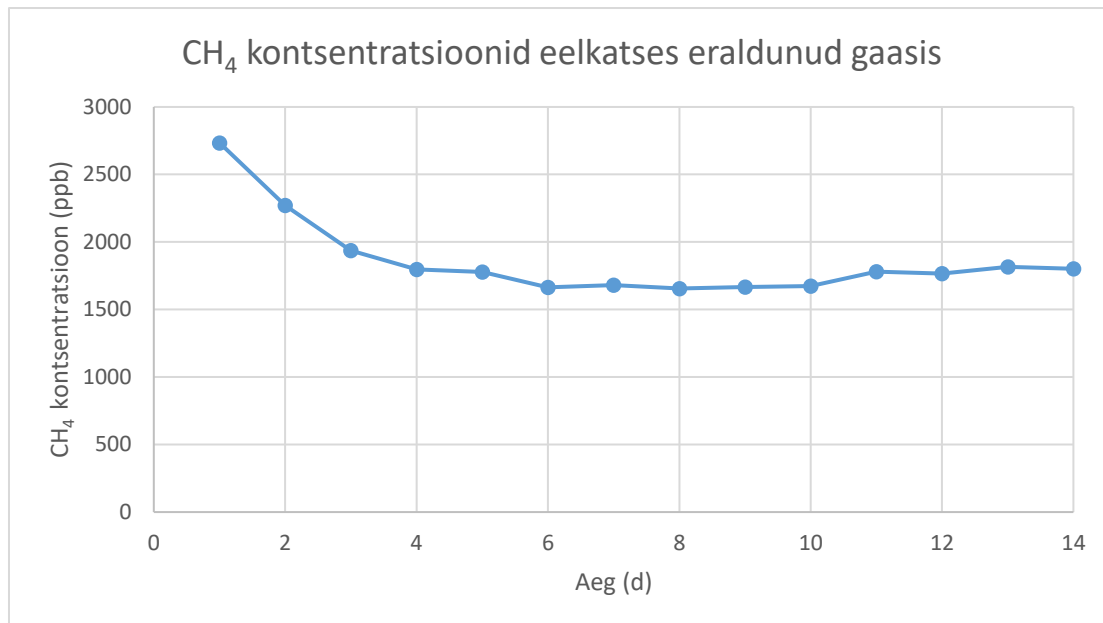
Joonistel 8 - 10 on toodud vastavalt süsihappegaasi, dilämmastikoksiidi ja metaani samal päeval võetud kolme proovi keskmised kontsentratsioonid 14 päevase ajavahemiku jooksul biolagunevate jäätmete fermentatsioonil bokashi meetodil tekkinud gaasi koostises.



Joonis 8. Eelkatses biojäätmete fermenteerimisel bokashi meetodil eraldunud süsihappegaasi kontsentratsioonid (ppm) 14 päeva jooksul.



Joonis 9. Eelkatses biojäätmete fermenteerimisel bokashi meetodil eraldunud dilämmastikoksiidi kontsentratsioonid (ppb) 14 päeva jooksul.



Joonis 10. Eelkatses biojäätmete fermenteerimisel bokashi meetodil eraldunud metaani kontsentratsioonid (ppb) 14 päeva jooksul.

Eelkatse läbiviimine kinnitas, et koostatud katseseadme abil õnnestub mõõta eralduva gaasi koguseid mõõtemääramatusega ± 100 mL ning juhtis tähelepanu ka vajadusele täpselt järgida proovivõtu eeskirja. Kuna kõikides analüüsitud gaasiproovides saavutasid eelkatses kontsentratsioonid alates 6.katsepäevast praktiliselt stabiilse nivoo (vt joonised 8-10), otsustati ka teisel katseperioodil viia läbi kompostimine 14 päeva jooksul. Teise katseperioodi planeerimisel otsustati lisada toidujäätmetele ka valmistoidu jäätmeid, mis moodustavad Eestis tekkivatest toidujäätmetest märkimisväärse osa (35 %, vt joonis 1) ning viia läbi paralleelkatse teise kompostimisämbriga, kus anaeroobne protsess toimub ilma bokashi kliideta. Et tulemused oleksid võrreldavad, otsustati teise katseperioodi kompostitavad segud valmistada ühesuguse koostisega.

4.2 Teine katseperiood

Teine katseperiood toimus ajavahemikus 29.01.2020-12.02.2020 (14 päeva). Kasutusel oli kaks 20-liitrist ämbrit, kuhu esimesse lisati bokashi kliidega vaheldumisi kompostitav materjal, teise ämbrisse aga ainult kompostitav materjal (vt fotod lisas 3). Eesmärk oli saada mõlemasse anumasse võimalikult sarnane kompostitav materjal, et võrrelda gaasiteket bokashi kliide

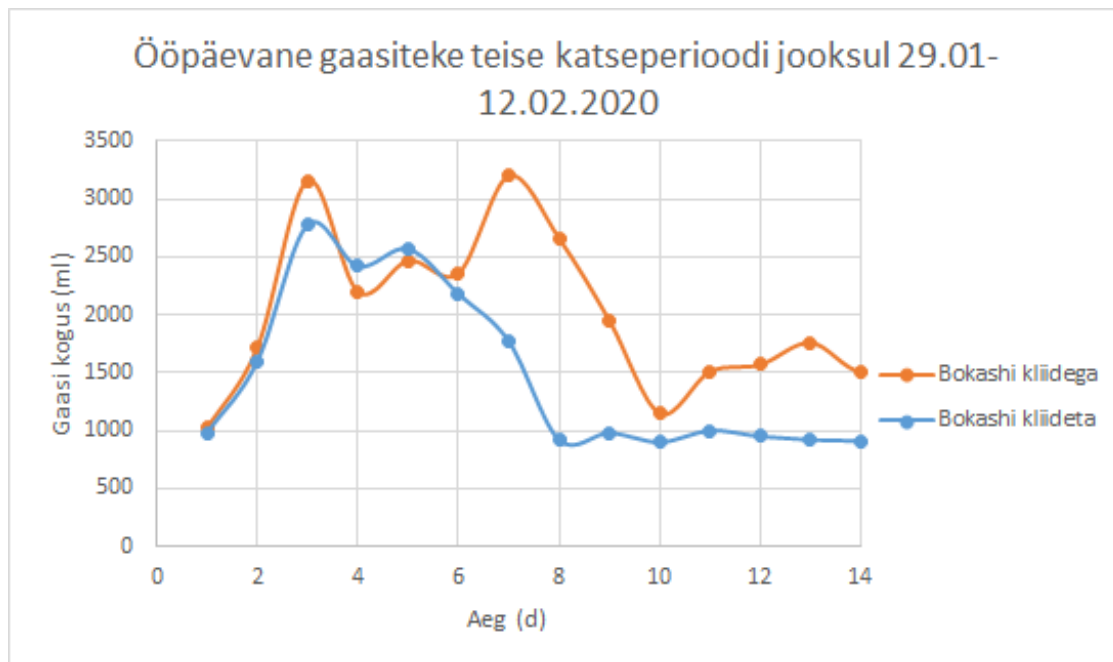
toimel sama koostisega kompostitavast materjalist, kuhu kliisid ei lisatud. Kompostitava materjali koostis on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Kompostitava materjali koostis teisel katseperioodil

Kompostitava materjali koostisosad	Anaeroobne fermenteerimine bokashi kliidega		Anaeroobne fermenteerimine (kliideta)	
	Mass (kg)	%	mass (kg)	%
Valmistoidu jäägid	5,35	49	5,35	50
Toortoidu jäägid	2,6	24	2,6	24
Kohvimasina jääk	0,45	4	0,45	4
Puulehed	2,35	21	2,35	22
Bokashi kliid	0,2	2	0	0
KOKKU	10,95	100	10,75	100

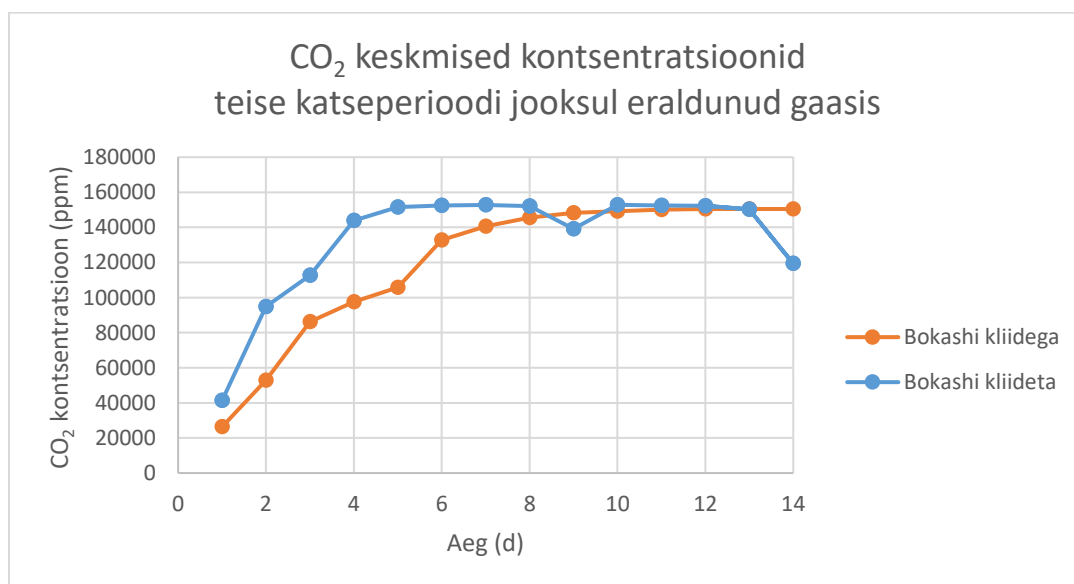
4.2.1 Teise katseperioodi tulemused

Teise katseperioodi jooksul eraldus bokashi kliidega kompostimisämbrist 32,86 liitrit gaasi ja ilma kliideta ämbrist 23,6 liitrit. Joonisel 11 on esitatud teise katseperioodi gaasitekke graafikud, kust on näha, et perioodi jooksul on olnud gaasiteke kõikuv, stabiilsus on tekkinud ainult bokashi kliideta katseseadmes alates kaheksandast päevast. Kuna proovivõtupudelite arv oli planeeritud 14-le katsepäevale ning kõikide gaasiproovide analüüs viidi läbi pärast katseperioodi lõppu, ei olnud võimalik katseperioodi pikemalt jätkata. Ehkki kirjandusest pärit katses (Bosch *et al.* 2020) toimus bokashi kompostimine 6 ja 8 nädalat (viidi läbi kahel korral), oli pikema perioodi valik põhjendatud ilmselt sellega, et paralleelselt toimus ka tavakompostimise katse, mis 2-nädalase katseperioodiga ei annaks kvantitatiivset tulemust kasvuhoonegaaside emissioonide osas, samuti ei valmi sellise lühikese perioodi jooksul aeroobsetes tingimustes kompost, mida saab põllul kasutada (erinevalt bokashi kompostimisel 14 päevaga saadavast kompostist). Ootuspäraselt tekkis bokashi kliidega kompostimisel gaasi rohkem (ca 28 %) võrreldes kliideta süsteemiga.



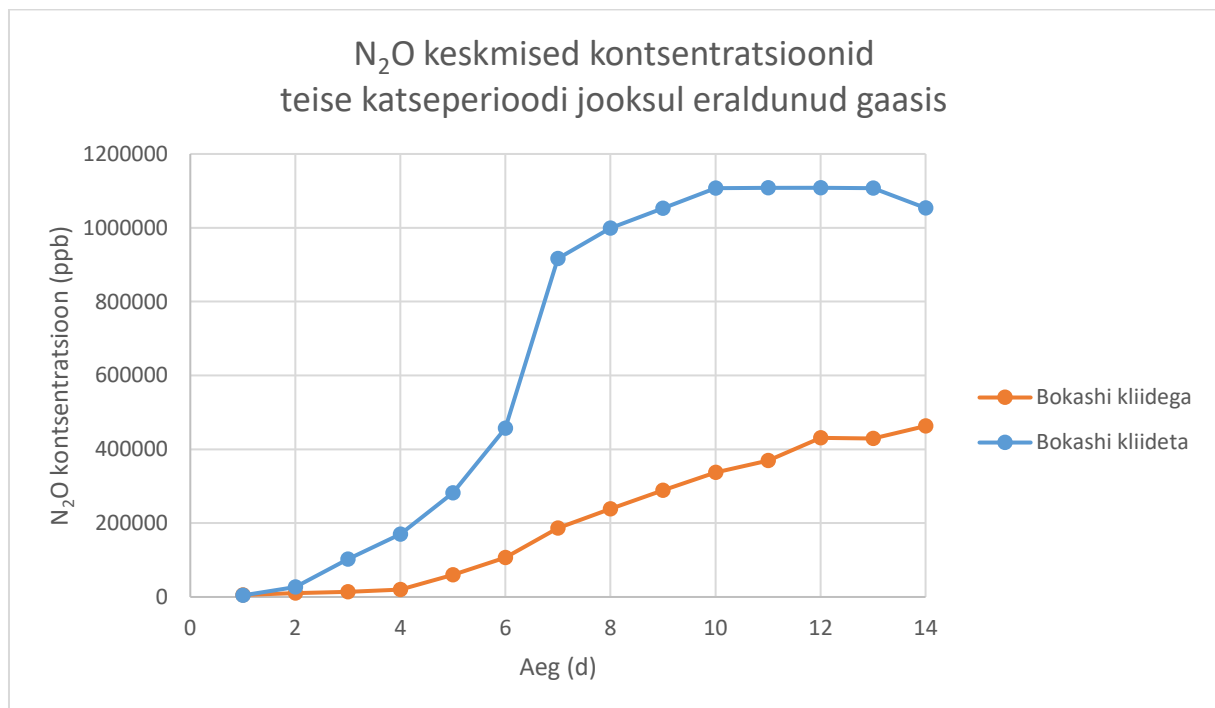
Joonis 11. Ööpäevane gaasiteke biojäätmete fermenteerimisel teise katseperioodi jooksul.

Kokku võeti teise katseperioodi jooksul mõlemast katseseadmest 42 proovi (igal päeval 3 proovivõtupudelit kummastki seadmest), millest kahe proovi võtmine ebaõnnestus ning ebapiisava gaasikoguse tõttu ei saanud neid arvestada. Pärast katseperioodi lõppu analüüsiti kõik proovid gaaskromatograafiliselt ning mõõdetud kasvuhoonegaaside CO_2 , N_2O ja CH_4 kolme proovi keskmised kontsentratsioonid on esitatud vastavalt joonistel 12 – 14.



Joonis 12. Teise katseperioodi jooksul biojäätmete fermenteerimisel eraldunud süsihappegaasi kontsentratsioonid bokashi kliidega ning ilma, 14 päeva jooksul.

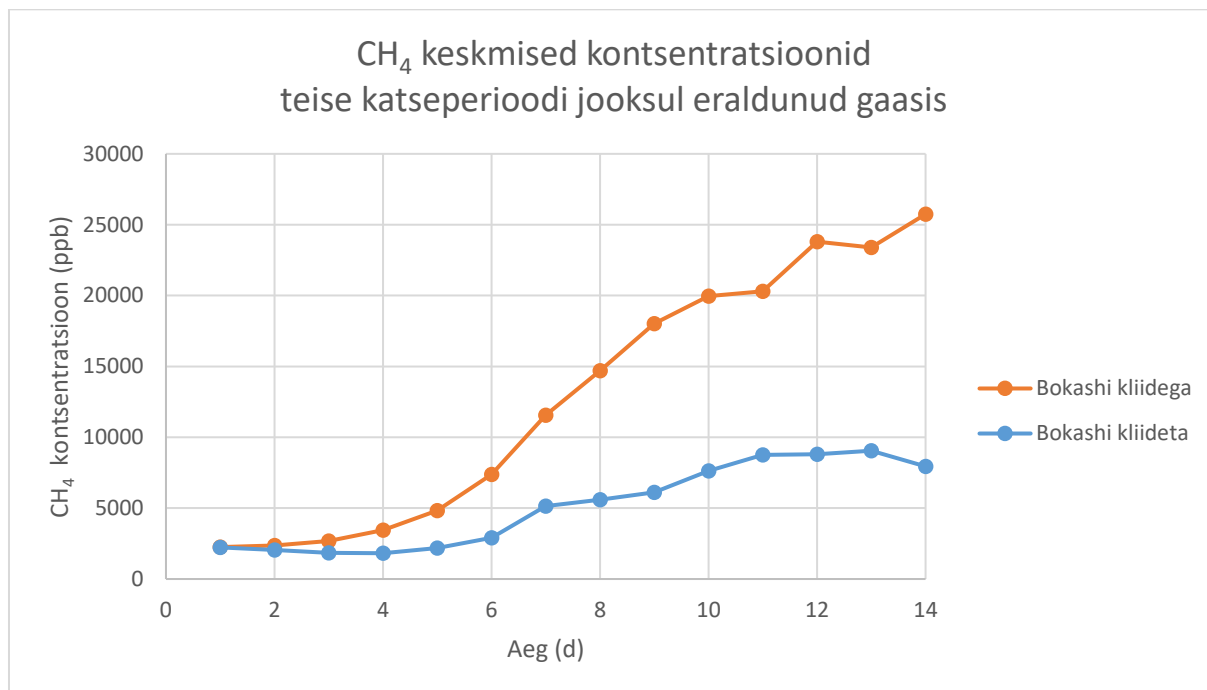
Süsihappegaasi emissioonides teise katseperioodi jooksul märkimisväärsed erinevusi ei ole kahe katse tulemustes märgata. Kuna kompostitav materjal (kuni 77 % toidujäätmed) on süsiniku- ning hapnikurikas, toimub lagunemisel süsihappegaasi teke eelistatult. Suur süsinikusisaldus on ka puulehtedes (C/N suhe ca 90:1), mida oli kompostitavas materjalis ca 1/5. Võimalik, et kasutatud plastämbrite hermeetilisus ei olnud ideaalne, mis võis põhjustada õhuhapniku sattumist kompostimiskeskkonda ning kallutada lagunemist aeroobse protsessi suunas, seega süsihappegaasi teket soodustavalt.



Joonis 13. Teise katseperioodi jooksul biojäätmete fermenteerimisel eraldunud diämmastikoksiidi kontsentratsioonid bokashi kliidega ning ilma, 14 päeva jooksul.

Jooniselt 13 on näha, et diämmastikoksiidi kontsentratsioonid plastämbri, millele bokashi kliisid ei lisatud ületab kliidega ämbri sisaldusi terve katseperioodi jooksul. 14.päeval on kontsentratsioonide erinevus juba ligikaudu kahekordne. Teades, et N₂O panustab kasvuhoonegaasidesse CO₂ ekvivalendina 235-kordselt võrreldes süsihappegaasiga, võib bokashiga kompostimist pidada tunduvalt keskkonnasõbralikumaks meetodiks kuna mõjutab kasvuhooneefekti vähem võrreldes protsessiga, mis toimus ilma bokashi kliideta. N₂O kontsentratsioonid 14-päevase perioodi võrdluses nii eelkatses kui ka teise katseperioodi

fermenteerimisel bokashi kliidega on andnud hea kokkulangevuse, vastavalt 424520 ja 463200 ppb (vt mõõtmistulemusi lisas 4, erinevus alla 10 %).



Joonis 14. Teise katseperioodi jooksul biojäätmete fermenteerimisel eraldunud metaani kontsentratsioonid bokashi kliidega ning ilma, 14 päeva jooksul.

Metaani kontsentratsioonid teisel katseperioodil osutusid tunduvalt suuremaks kui eelkatses saadud väärtused (eelkatses 1802 ppb, teise katseperioodi 14.päeval saadud kontsentratsioonid bokashi kliidega ja ilma vastavalt 25 700 ppb ja 7 900 ppb, mõõdetud kontsentratsioonid on lisas 4), millel võib olla kaks põhjust. Esiteks võis teises katseperioodis kasutatud suur valmistoidu jääkide (kuni 50%) osakaal soodustada metaaniteket (eelkatses fermenteeriti ainult toortoidu jääke koos kohvimasina jäägi ja puulehtedega) või oli eelkatses probleem kompostimisämbri hermeetilisusega, mistõttu metaaniteke jäi tunduvalt madalamaks isegi ilma kliideta fermenteeritud plastämbri eraldunud gaasisegus (koguni 77 %). Teisel katseperioodil mõõdetud metaani kontsentratsioonid erinevad kahel erineval viisil fermenteeritud kompostisegude puhul 14-päevase katseperioodi lõpus üksteisest samuti ligi 70 %, mis demonstreerib antud juhul samasuguse koostisega kompostitavate materjalide korral bokashi kliide tõhusust anaeroobse protsessi läbiviimisel võrreldes protsessiga, kus kliisid ei lisatud. Metaani mõju kasvuhooneefektile võrreldes CO₂-ga on samade gaasikoguste korral 25 korda

suurem. Käesolevas töös mõõdetud metaani kogused olid võrreldes eraldunud süsihappegaasiga tunduvalt madalamad ning seega mõjutavad suhteliselt vähe kasvuhooneefekti.

4.3 Tulemused ja arutelu

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida bokashi kliidega kompostimise mõju kasvuhoonegaaside (CO_2 , N_2O ja CH_4) tekkele. Selleks, et võrrelda kolmes katses (eelkatse ja teise perioodi kaks paralleelkatset) eraldunud ööpäevaseid gaaside koguseid, tuleb need teisendada võrdsele kompostitava materjali kogusele (nt 1 kg). Lisatud bokashi kliide mass on samuti arvestatud kompostitava materjali massi hulka. Tulemused on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Kompostimisel eraldunud gaasitekke tulemused.

Katse	Kompostitav materjal	Kompostitava materjali mass (kg)	Eraldunud gaasi ruumala (mL)	Keskmine ööpäevane gaasiteke 1 kg kompostitava materjali kohta (mL/kg×d)
Eelkatse bokashi kliidega	toortoidu jäägid + kohvimasina jääk + puulehed + bokashi kliid	11,13±0,06	29190±100	187,3
2.katseperiood bokashi kliidega	valmistoidu jäägid + toortoidu jäägid + kohvimasina jääk + puulehed + bokashi kliid	10,95±0,06	32860±100	214,4
2.katseperiood bokashi kliideta	valmistoidu jäägid + toortoidu jäägid + kohvimasina jääk + puulehed	10,75±0,06	23600±100	156,8

Kuna eelkatses ja teise katseperioodi katsetes kasutati erineva koostisega kompostitavat materjali, siis võime väita, et valmistoidu jääkide lisamine kompostisegule on suurendanud ööpäevast gaasiteket ca 27 mL võrra. Kuna teisel katseperioodil oli kompostitav materjal

ühesuguse koostisega, siis bokashi kliide lisamine segule on mõjutanud keskmist ööpäevast gaasiket tunduvalt suuremal määral. Kliidega kompostimisel eraldus 1 kilogrammi kompostitava materjali kohta ööpäevas keskmiselt koguni 57,6 mL rohkem gaasi.

Järgnevalt on mõõdetud kasvuhoonegaaside kontsentratsioonid teisendatud võrreldavateks tulemusteks kogu katseperioodi (14 päeva) jaoks, et oleks võimalik hinnata läbiviidud katsete tulemusi kirjandusest leitud eksperimentaalsete andmetega. Selleks on arvatud keskmised kasvuhoonegaaside kontsentratsioonide väärtused kompostimisperioodi jaoks ööpäevaste kontsentratsioonide ja vastavas ajavahemikus eraldunud gaasi ruumalade kaudu. Arvandmed vastavate arvutuste jaoks on võetud lisas 4 toodud katseandmetest. Mõõdetud kontsentratsioonid ppm ja ppb ühikutes on teisendatud massiühikuteks, et hinnata kasvuhoonegaaside emissioone läbiviidud katsetes. Kasvuhoonegaaside keskmised kontsentratsioonid (c_{CO_2} , c_{N_2O} ja c_{CH_4}) on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Kasvuhoonegaaside keskmised väärtused 14-päevalise katseperioodi jooksul

	c_{CO_2}		c_{N_2O}		c_{CH_4}	
	ppm	mg/L	ppm	mg/L	ppm	mg/L
Eelkatse	134 600±2700	260,87±0,05	366±7	0,71±0,01	1,94±0,04	$(0,14±0,003) \times 10^{-2}$
2.periood bokashi kliidega	104 200±2100	201,88±0,05	142±3	0,28±0,01	25,87±0,5	$(1,83±0,04) \times 10^{-2}$
2.periood bokashi kliideta	112 900±2200	218,82±0,05	402±8	0,78±0,01	10,45±0,2	$(0,74±0,01) \times 10^{-2}$

Kasutades kasvuhoonegaaside kontsentratsioone tabelist 3 on kõigi kolme katse jaoks leitud kasvuhoonegaaside emissioonide (m_{GHG}) massid ning tehtud ümberarvutused dilämmastikoksiidi ja metaani puhul süsihappegaasi ekvivalentideks (CO_2 -ekv) ühikulise kompostitava materjali koguse (1 tonn) kohta ööpäevas. Tulemused on esitatud tabelis 4.

Tabel 4. Kolmes katses eraldunud kasvuhoonegaaside (GHG) ööpäevased kogused ja summaarselt eraldunud GHG süsinikdioksiidi ekvivalentides (kg CO₂-ekv) ühe tonni kompostitava materjali kohta.

	GHG	c _{GHG}	m _{GHG}	m _{GHG} *	m _{GHG} **	Σ _{GHG}
	gaasid	mg/L	g	kg GHG/t×d	kg CO ₂ -ekv/t×d	kg CO ₂ -ekv/t×d
EELKATSE	CO ₂	260,87	7,613	4,89×10 ⁻²	4,89×10 ⁻²	0,0801
	N ₂ O	0,71	2,07×10 ⁻²	1,33×10 ⁻⁴	3,12×10 ⁻²	
	CH ₄	1,4×10 ⁻³	3,99×10 ⁻⁵	2,56×10 ⁻⁷	6,4×10 ⁻⁶	
BOKASHI KLIIDEKA	CO ₂	201,88	6,633	4,33×10 ⁻²	4,33×10 ⁻²	0,0575
	N ₂ O	0,28	9,26×10 ⁻³	60,4×10 ⁻⁴	1,42×10 ⁻²	
	CH ₄	18,3×10 ⁻³	6,01×10 ⁻⁴	39,2×10 ⁻⁷	98×10 ⁻⁶	
BOKASHI KLIIDEKA	CO ₂	218,82	7,190	4,69×10 ⁻²	4,69×10 ⁻²	0,0756
	N ₂ O	0,78	1,84×10 ⁻²	1,22×10 ⁻⁴	2,87×10 ⁻²	
	CH ₄	7,4×10 ⁻³	1,75×10 ⁻⁴	11,6×10 ⁻⁷	29×10 ⁻⁶	

m_{GHG}* – normeeritud kasvuhoonegaaside mass 1 tonni kompostitava materjali kohta ööpäevas;

m_{GHG}** – kasvuhoonegaaside mass 1 tonni kompostitava materjali kohta ööpäevas CO₂-ekvivalentides.

Kui summaarsete kasvuhoonegaaside emissioone on hinnatud CO₂-ekvivalentides, siis tabelist 4 on näha, et metaanist tulenev kasvuhoonegaaside koormus on mitme suurusjärgu võrra madalam võrreldes süsihappegaasi ja dioksiidi panustest ning seetõttu oluliselt ei mõjuta summaarset kasvuhoonegaaside kogust.

Kirjandusest (Bosch *et al.* 2020) on teada andmed ühe mastaapsema uuringu kohta, kus paralleelselt kompostiti muruniitmeid kahel meetodil – bokashi meetodiga anaeroobsetes tingimustes ning aeroobse tavakompostimisega. Selle uuringu eesmärgiks oli võrrelda kahe meetodi kasvuhoonegaaside emissioone CO₂-ekvivalentides. Kahjuks käesoleva bakalaureusetöö käigus ei olnud võimalik läbi viia tavakompostimise eksperimenti (nii ajalise kestvuse kui ka põhimõtteliselt keerukama katseseadme ehituse tõttu), pakkus töö autorile huvi, kas sellise lihtsa laboratoorse bokashi kompostiseadmega on võimalik eralduvate kasvuhoonegaaside koguseid määrata ja võrrelda neid Hollandis teostatud uuringu tulemustega. Ülalmainitud töös viidi läbi kaks eksperimenti, mis toimusid ka mõnevõrra erineva ajavahemiku jooksul (6 ja 8 nädalat) ning kompostitavaks materjaliks olid muruniitmeid. Ümberarvutatult 1 tonni kompostitava materjali kohta paiskus õhku kompostimisperioodi

jooksul 11,8 kg CO₂-ekvivalenti kasvuhoonegaase (uurimuses teostati kasvuhoonegaaside mõõtmise süsiniku ja lämmastiku sisalduse vähenemise analüüside alusel). Ühe ööpäeva keskmiseks emissiooniks kujunes 0,24 kg CO₂-ekvivalenti, mis on ca 3,5 korda suurem kogus, kui käesolevas töös saadud tulemused (vt tabelis 4 viimase veeru tulemusi bokashiga kompostimisel, kahe katse – eelkatse ja bokashiga kompostimise – keskmine ca 0,07 kg CO₂ ekv). Kindlasti on katsetulemused seetõttu omavahel raskesti võrreldavad, sest Hollandis läbiviidud bokashi kompostimine toimus nõ pilootskaalas (kompostitava materjali kogus kahe eksperimendi keskmisena oli 14 100 kg), samas kui käesolevas töös tehtud katsed jäävad laboratoorsesse skaalasse (kompostitava materjali mass keskmiselt ca 11 kg). Samuti võib eralduvate kasvuhoonegaaside emissioone mõjutada ka kompostitava materjali erinevus (võrreldavas uurimuses kompostiti muruniitmeid, käesolevas töös toidujäätmeid), sest kompostitavate materjalide süsiniku ja lämmastiku suhe on erinev (muruniitmetel 20, toidujäätmetel 10). Kaks tööd erinevad ka lisatud bokashi kliide koguse ja koostise poolest. Bosch *et al.* 2020 on kirjeldanud lisatud bokashi stardisegu kui merekarpide lubjast, savimineraalidest, spetsiifilistest mikroorganismidest (firmalt Microferm) ja veest koosnevat suspensiooni (lisati muruniitmetele 4,4 %). Käesolevas bakalaureusetöös kasutati bokashi kliide valmistoodet firmalt Organico, mida lisati ca 1,8 %. Tuleb aga positiivsena märkida, et käesolevas töös saadud tulemused on põhimõtteliselt samas suurusjärgus Hollandis läbiviidud eksperimendiga, ehkki erinevusi oli nii katse tingimustes kui ka eraldunud gaaside kontsentratsioonide määramismeetodites.

Bosch *et al.* 2020.aastal publitseeritud artiklis olid avaldatud ka eksperimentaalsed tulemused tavakompostimisel eraldunud kasvuhoonegaaside emissioonide kohta, mis ööpäevase heitmena 1 tonni kompostitava materjali kohta oli 5,14 kg CO₂-ekvivalenti. Kuna käesolevas bakalaureusetöös tavakompostimise eksperimenti läbi ei viidud, ei ole võimalik toidujäätmetest eralduvate kasvuhoonegaaside kogust muruniitmetest tekkinud tavakompostimisel eraldunud emissiooniga võrrelda.

Käesolevas bakalaureusetöös õnnestus läbi viia bokashi kliidega kompostimine lihtsas katseseadmes ning uurida eralduvate kasvuhoonegaaside koguseid ning kontsentratsioone. Läbiviidud eksperimentaalne töö andis hulgaliselt kogemusi bokashi kompostimise edukaks läbiviimiseks ning kasvuhoonegaaside mõõtmisteks. Bokashi kompostimise ulatuslikum rakendamine väikemajapidamistes aitaks kahtlemata kaasa tekkivate toidujäätmete suunamisele aineringsse kompostina. Keskkonnahoiu seisukohalt on selles protsessis eralduvate kasuhoonegaaside emissioonide kvantitatiivne hindamine väga oluline.

KOKKUVÕTE

Biojäätmete lahuskogumine ja nende kompostimine annab võimaluse suunata orgaanilistes jätmetes sisalduvad toiteelemendid valmistatud kompostiga aineringsesse, panustades sellega keskkonnahoidu ja vähendades prügilasse ladestatavate biolagunevate ainete hulka, mis omakorda vähendab prügilagaasi tootmist. Paraku kaasneb kompostimisega ka teatud negatiivne mõju keskkonnale, mis väljendub kasvuhoonegaaside tekkes. Käesolevas bakalaureusetöös keskenduti ühele uudsele biojäätmete kompostimisviisile, nimelt kompostimisele bokashi meetodil. Töö eesmärgiks oli lihtsa katseseadme koostamine ja katsetoodika väljatöötamine, et kvantitatiivselt hinnata, millised on kasvuhoonegaaside (CO_2 , N_2O ja CH_4) emissioonid toidujäätmete kompostimisel bokashi meetodiga. Tegemist on anaeroobse protsessiga, kus biolagunevatele jätmetele lisatakse bokashi kliisid, mille koostises on spetsiifilised mikroorganismid, kes väidetavalt aitavad kompostitavat materjali lagundada ja muudavad komposti koostises olevad toitained taimedele paremini omastatavaks. Bokashi kompostimist saab teostada ka siseruumides, sest see on lihtne, toimub kompaktses anumaskompost valmib kiiresti (väidetavalt 14 päevaga) ja protsessi käigus ei teki ebameeldivat lõhna. Kirjanduse andmetel tekib bokashi kompostimisel võrreldes tavakompostimisega vähem kasvuhoonegaase. Käesoleva bakalaureusetöö eksperimentaalse töö eesmärgiks oli uurida toidujäätmete kompostimist bokashi meetodil kasvuhoonegaaside emissioonide tekke seisukohalt, töötada välja lihtne katseseade, mis võimaldaks kahe nädala jooksul koguda kompostimise käigus eralduvate gaaside koguseid ning gaaskromatograafiliselt mõõta kasvuhoonegaaside kontsentratsioone.

Eksperimentaalne töö viidi läbi kahe 14-päevase katseperioodi jooksul. Katseseade koosnes 20-liitrisest plastämbrist, kuhu pandi toidujäätmed kihiti bokashi kliidega ja gaasi kogumise plastmahutist. Tekkinud gaasist võeti igapäevaselt gaasiproovid, mida analüüsiti gaaskromatograafia. Saadud andmete alusel leiti bokashi kompostimisel tekkinud kasvuhoonegaaside emissioon CO_2 -ekvivalentides, mis oli väljendatuna 1 tonni kompostitava materjali kohta ca 0,07 kg ööpäevas. Saadud tulemuste võrdlemisel kirjandusest (Bosch *et al.* 2020) leitud andmetega selgus, et toidujäätmete kompostimisel oli kasvuhoonegaaside heide ca 3,5 korda väiksem võrreldes muruniitmetest bokashi kompostimisel õhku paisatud emissiooniga.

SUMMARY

Emissions of greenhouse gases from composting with bokashi method

Separate collection of biowaste and its composting are the ways to remit essential nutrients into biogeochemical cycle. This is a contributing action to environmental protection and reduces the amount of landfilled biowaste, which in turn is cutting down the production of landfill gas. Unfortunately, composting also has a certain negative impact to the environment, related to formation of greenhouse gases. Current research work is focused on composting biowaste (mainly food waste) with bokashi method. The aim of this work was to evaluate quantitatively amount of emitted greenhouse gases (GHG: CO₂, N₂O and CH₄) when composting with bokashi method. Bokashi composting is an anaerobic process, where bokashi bran is added to biodegradable waste. One important component in bokashi bran is a mixture of specific microorganisms, which helps degrade composting material and transforms the nutrients inside bokashi compost into more accessible form for plants. Bokashi composting can be successfully implemented indoors: it is convenient and fast (compost is ready within about 2 weeks), takes place in closed container and it is not sheading unpleasant odour. Based on literature data, emissions of greenhouse gases from composting of biodegradable waste with bokashi method are smaller than those that are from a usual composting. The aim of the experimental work was to develop a simple experimental set, which enables to measure the quantities of greenhouse gases from composting over two weeks. Concentrations of gases were measured with gascromatograph.

Experimental work was conducted within two periods of 14 days. Experimental set included waste bin (20 L), where food waste and bokashi bran were placed in layers, and a soft plastic container for collecting evolved gas. Every day three gas samples were taken from the gas container and analyzed on concentrations of CO₂, N₂O and CH₄. Based on measured data the GHG emissions of bokashi composting of one tonne of composting material was evaluated. Food waste in current experimental work was emitting 0,07 kg CO₂-ekv/per day, that is 3,5 times smaller than emissions from composting of roadside mowing's with bokashi method, described in literature (Bosch *et al.* 2020). Conditions in those two experiments were not identical, therefore this difference is explainable. The advantage of bokashi composting described in literature lays in result that emissions of GHG are nearly 20 times lower than those of usual aerobic composting that we expect will be also with food waste.

Tänuavaldused

Autor soovib tänada juhendajaid ja kaasosalisi, kes aitasid bakalaureusetöö valmimisele kaasa, juhendajaid Karin Hellatit ja Teele Sikkat ning eksperimendi läbiviimisel nõu ja jõuga abiks olnud Alar Teemuskit ja Martin Maddissoni. Samuti tänan Chemicumi kohviku Meritar&Co töötajaid, kes kogusid eksperimentide jaoks liigiti vajalikku kompostitavat materjali.

KASUTATUD KIRJANDUS

Abdul Aziz N. I. H., Hanafiah M. M., Mohamed Ali M. Y. (2019) Sustainable biogas production from agrowaste and effluents – A promising step for small-scale industry income. *Renewable Energy* 132, 363–369.

Anderson, K. (2014) Magistritöö- *PUIDUJÄÄTMETE KOMPOSTIMISE UURING JA KOMPOSTIMISPLATSI PROJEKTEERIMINE*.
https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/1804/Kairi_Anderson_MA2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y Tartu.

Bosch, M., Hitman, A., Hoekstra, J.F. *Fermentation (Bokashi) versus Composting of Organic Waste Materials: Consequences for Nutrient Losses and CO₂-footprint*
https://www.agriton.nl/wp-content/uploads/2016/08/Bosch_short_paper_for_UV2016-0827.pdf viimati alla laetud 26.05.2020

El-Haggar, S.M. (2007) *Sustainable Industrial Design and Waste Management*. Elsevier.
Footer, A. (2014) *Bokashi Composting. Scraps to Soil in Weeks*.
<https://newsociety.com/books/b/bokashi-composting> New Society Publishers.

He Y. (2000) Measurements of N₂O and CH₄ from the aerated composting of food waste. *The Science of The Total Environment* 254, 65–74.

Higa, T., Parr, J. F. *BENEFICIAL AND EFFECTIVE MICROORGANISMS for a SUSTAINABLE AGRICULTURE AND ENVIRONMENT*.
<https://www.teraganix.com/category-s/1002.htm> viimati alla laetud 26.05.2020

Jouhara H., Czajczyńska D., Ghazal H., Krzyżyńska R., Anguilano L., Reynolds A. J., Spencer N. (2017) Municipal waste management systems for domestic use. *Energy* 139, 485–506.

Jäätmeseadus (24.06.2013). *Riigi Teataja* I. Kasutatud 27.10.2019,
<https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006>

Keppart, V. (2011) *Keskkonnakaitse: jäätmekäitlus*. Kirjastus Argo, Tallinn.

Keskkonnaministeerium (a). *Kui palju Eestis kasvuhoonegaase tekib?*
<https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/kliima/rahvusvaheline-aruanne/kui-palju-eestis-kasvuhoonegaase-tekib> viimati uuendatud 15.04.2020

Keskkonnaministeerium (b). (2020) *Greenhouse gas emissions in Estonia 1990-2018. National inventory report. Kasvuhoonegaaside emissioonid Eestis 1990-2018. Riiklik inventuuri aruanne.* https://www.envir.ee/sites/default/files/nir_est_1990-2018_15.03.2020.pdf Eesti.

Kriipsalu, M. (2001) *Jäätmeraamat*. Kirjastus Ehitame, Tallinn.

Kriipsalu, M., Maastik, A., Truu, J. (2016) *Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, Tallinn.

Lou X. F., Nair J. (2009) The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. *Bioresource Technology* 100, 3792–3798.

Masing, K. (2019) RMK „Metsamees“ 135, 12
https://media.rm.k.ee/files/MM135_veebr2019%20spreads.pdf

Maves. (2019) *Tartu linna olmejäätmete sortimisuurim.*
https://www.tartu.ee/sites/default/files/research_import/2019-10/Tartu%20linna%20olmejaatmete%20sortimisuurim.pdf Tallinn.

Merfield, C. N. (2013). Treating food preparation ‘waste’ by Bokashi fermentation vs. composting for crop land application: A feasibility and scoping review. Lincoln, Uus-Meremaa: The BHU Future Farming Centre: 23.

Murumaa, K. (2018) Magistritöö- *UURING TOIDUJÄÄTMETE TEKKIMISE PÕHJUSTE JA VÄHENDAMISE VÕIMALUSTE KOHTA TALLINNA HOTELLIDE NÄITEL.*
https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4030/Murumaa%20Kristel_LM%20mag_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y Tartu.

Sánchez A., Artola A., Font X., Gea T., Barrena R., Gabriel D., Sánchez-Monedero M. Á., Roig A., Cayuela M. L., Mondini C. (2015) Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters* 13, 223–238.

Sánchez-Monedero M. A., Serramiá N., Civantos C. G.-O., Fernández-Hernández A., Roig A. (2010) Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere* 81, 18–25.

Sellik, S. (2014). Lõputöö- *Prügilagaasi kogumise vajalikkus, efektiivsus ja kasutamine Aardlapalu prügilas näitel.*
http://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/42836/Sellik_Siim.pdf Tartu.

Säästva Eesti Instituut. (2008) *Eestis tekkinud olmejäätmete (sh eraldi pakendijäätmete ja biolagunevate jäätmete) koostise ja koguse analüüs. Segaolmejäätmete sortimisuuring.*
<https://www.envir.ee/sites/default/files/olmejaatmeteuuring2008.pdf> Tallinn.

Säästva Eesti Instituut. (2013) *Eestis tekkinud segaolmejäätmete, eraldi kogutud paberi- ja pakendijäätmete ning elektroonikaromu koostise uuring.* <http://eesringlus.ee/wp-content/uploads/2013/02/SEI-sortimisuuring-20131.pdf> Tallinn.

Säästva Eesti Instituut. Moora, H; Urbel-Piirsalu, E; Õunapuu, K (2015) *Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti kodumajapidamistes ja toitlustusasutustes.*
https://www.envir.ee/sites/default/files/news-related-files/toidujaatmete_teke_eesti_kodumajapidamistes_ja_toitlustusasutustes.pdf

LISAD

Lisa 1. Bokashi komposter ja fotod kasutatud katseseadmest.



Foto 1



Foto 2



Foto 3

Foto 1 – näidis kommertsiaalselt müüdavast bokashi kompostimisanumast (23 liitrit);

Foto 2– kaanega suletud plastämber (20 liitrit) kompostitava materjaliga, mis on voolikuga ühendatud plastmahutiga (mahlapakend ca 5 liitrit) eralduvate gaaside kogumiseks;

Foto 3– proovivõtusüsteem: plastmahutiga ühendatud proovivõtupudel, kuhu torukolmiku kaudu juhitakse eralduv gaas ja süstal plastmahutist gaasi väljavõtmiseks.

Lisa 2. Toortoidu jääkide kompostimine.



Foto 4



Foto 5

Foto 4 – toortoidu jäägid;

Foto 5 – toortoidu jäägid kompostimisämbri kihiti bokashi kliidega.

Lisa 3. Teise katseperioodi kompostitav materjal.



Foto 6



Foto 7

Foto 6 – kogutud valmistoidu jäägid;

Foto 7 – täidetud kompostimisämbel, pealmine kiht on kohvimasina jääk.

Lisa 4. Bokashi kompostimise eksperimentaalse osa mõõtmistulemused

Tabel 1. Eelkatses mõõdetud bokashi kompostimise gaasi kogused ja kasvuhoonegaaside kontsentratsioonid.

päev	V _{gaas} (L)	ppm _{CO2}	c _{CO2} (mg/L)	m _{CO2} (mg)	ppb _{N2O}	c _{N2O} (mg/L)	m _{N2O} (mg)	ppb _{CH4}	c _{CH4} (mg/L)	m _{CH4} (mg)
1	2,76	87603	169,8	468,6	61673	0,12	0,33	2734	0,0019	0,0053
2	5,30	110361	213,9	1133,7	243062	0,47	2,50	2271	0,0016	0,0085
3	2,10	128180	248,4	521,6	324045	0,63	1,32	1936	0,0014	0,0029
4	3,18	141051	273,3	869,1	433061	0,84	2,67	1796	0,0013	0,0040
5	2,00	142227	253,7	507,4	442289	0,86	1,71	1777	0,0013	0,0025
6	3,31	152655	295,8	979,1	461304	0,89	2,96	1663	0,0012	0,0039
7	2,62	153266	297,0	778,1	466877	0,90	2,37	1681	0,0012	0,0031
8	1,40	153538	297,5	416,5	465563	0,90	1,26	1655	0,0012	0,0016
9	1,23	153901	298,2	366,8	469429	0,91	1,12	1667	0,0012	0,0014
10	1,29	153835	298,1	384,5	466059	0,90	1,16	1672	0,0012	0,0015
11	1,10	153482	297,4	327,1	428586	0,83	0,91	1779	0,0013	0,0014
12	1,06	153552	297,6	315,5	429732	0,83	0,88	1766	0,0012	0,0013
13	0,91	153380	297,2	270,5	426299	0,83	0,75	1816	0,0013	0,0012
14	0,93	153222	296,9	276,1	424449	0,82	0,76	1802	0,0013	0,0012

Tabel 2. Teisel katseperioodil bokashi kliidega katses mõõdetud eraldunud gaasi kogused ja kasvuhoonegaaside kontsentratsioonid

päev	V _{gaas} (L)	ppm _{CO2}	c _{CO2} (mg/L)	m _{CO2} (mg)	ppb _{N2O}	c _{N2O} (mg/L)	m _{N2O} (mg)	ppb _{CH4}	c _{CH4} (mg/L)	m _{CH4} (mg)
1	2,74	26386	51,1	140,1	5532	0,01	0,03	2253	0,004	0,012
2	5,36	52902	102,5	549,5	10434	0,02	0,11	2361	0,004	0,024
3	4,83	86291	167,2	807,7	13638	0,03	0,13	2684	0,005	0,024
4	3,20	97474	188,9	604,4	19953	0,04	0,12	3441	0,007	0,021
5	2,66	105743	204,9	545,1	59744	0,12	0,31	4820	0,009	0,025
6	1,95	132704	257,2	501,5	107052	0,21	0,40	7387	0,014	0,028
7	1,15	140559	272,4	313,2	186165	0,36	0,41	11565	0,022	0,026
8	1,51	145583	282,1	426,0	238685	0,46	0,70	14694	0,028	0,043
9	1,57	148324	287,4	451,3	288442	0,56	0,88	18010	0,035	0,055
10	1,76	149195	289,1	508,8	337417	0,65	1,15	19955	0,039	0,068
11	1,51	150126	290,9	439,3	369066	0,72	1,08	20292	0,039	0,059
12	1,71	150479	291,6	498,6	431006	0,84	1,43	23794	0,046	0,079
13	1,57	150388	291,4	457,5	429553	0,83	1,31	23397	0,045	0,071
14	1,34	150546	291,7	390,9	463217	0,90	1,20	25735	0,050	0,067

Tabel 3. Teisel katseperioodil bokashi kliideta katses mõõdetud eraldunud gaasi kogused ja kasvuhoonegaaside kontsentratsioonid

päev	V _{gaas} (L)	ppm _{CO2}	c _{CO2} (mg/L)	m _{CO2} (mg)	ppb _{N2O}	c _{N2O} (mg/L)	m _{N2O} (mg)	ppb _{CH4}	c _{CH4} (mg/L)	m _{CH4} (mg)
1	2,58	41306	80,0	206,5	4288	0,008	0,021	2238	0,0043	0,0110
2	5,18	94742	183,6	951,0	27097	0,053	0,272	2061	0,0050	0,0261
3	4,75	112665	218,3	1037,0	102332	0,198	0,942	1846	0,0035	0,0166
4	1,77	143947	278,9	493,7	169781	0,329	0,582	1820	0,0035	0,0062
5	0,92	151578	293,7	270,2	281563	0,545	0,502	2175	0,0041	0,0037
6	0,98	152487	295,5	289,6	456647	0,885	0,867	2908	0,0056	0,0055
7	0,90	152757	296,0	266,4	976902	1,777	1,599	5145	0,0099	0,0089
8	1,00	152166	294,9	294,9	998983	1,936	1,936	5589	0,0107	0,0107
9	0,95	139113	269,6	256,1	1053100	2,041	1,939	6106	0,0118	0,0112
10	0,92	152744	296,0	272,3	1107314	2,146	1,974	7623	0,0147	0,0135
11	0,91	152447	295,4	268,8	1107847	2,147	1,954	8754	0,0169	0,0153
12	0,91	152214	295,0	268,4	1108350	2,148	1,954	8803	0,0171	0,0155
13	0,92	150318	291,3	268,0	1107263	2,146	1,974	9063	0,0174	0,0160
14	0,91	11947	23,2	21,1	1053196	2,041	1,857	7936	0,0153	0,0139

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Grete Kaljulaid,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Kasvuhoonegaaside emissioonid kompostimisel bokashi meetodiga,

mille juhendaja on Karin Hellat,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Grete Kaljulaid

01.06.2020